



Analisi e valutazione dei costi/benefici delle politiche/misure in tema di adattamento ai Cambiamenti Climatici e alla qualità – WP 4

Rapporto finale d'esecuzione del servizio di impostazione di una metodologia di valutazione degli impatti sul patrimonio culturale ed edilizio

Tale studio è stato realizzato e finanziato dal progetto CLIMAERA n°1606, nell'ambito del programma europeo di cooperazione territoriale transfrontaliera tra Francia e Italia ALCOTRA 2014-2020

PROGETTO ALCOTRA CLIMAERA

AZIONE WP4

VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO E DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUL PATRIMONIO CULTURALE

CIG Z802740C64



RELAZIONE

| | |
|--|-----|
| 1 - GENERALITA' E SCOPO DEL LAVORO | 3 |
| 2 - INDIVIDUAZIONE E CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI TRATTATI | 5 |
| 3 - INQUINANTI E FENOMENI ATMOSFERICI OGGETTO DI TRATTAZIONE | 7 |
| 4 - EFFETTI SUI MATERIALI DEGLI INQUINANTI ATMOSFERICI E DEI FENOMENI METEOCLIMATICI: DESCRIZIONE E INDIVIDUAZIONE DI FUNZIONI DI RELAZIONE CAUSA-EFFETTO E DOSE-RISPOSTA | 10 |
| 4.1 Descrizione e individuazione di funzioni dose/risposta | 10 |
| 4.2 Problematiche relative all'applicazione delle funzioni dose/risposta..... | 29 |
| 5 - DANNI ATTESI: APPLICAZIONE A DUE CASI CAMPIONE | 32 |
| 5.1 Il caso del Rame | 32 |
| 5.2 Il caso del Marmo | 36 |
| 6 – OPERAZIONI DI CONSERVAZIONE, RECUPERO E PROTEZIONE DELLE SUPERFICI ESTERNE DI OPERE CULTURALI, EDIFICI E OPERE INFRASTRUTTURALI E RELATIVI COSTI MEDI | 40 |
| 6.1 Problematiche di conservazione, recupero e protezione..... | 40 |
| 6.2 Intervenire sul degrado: due casi di studio torinesi..... | 44 |
| 7 – CONCLUSIONI E IPOTESI PER LO SVILUPPO DI ULTERIORI RICERCHE | 48 |
| 8 - RASSEGNA BIBLIOGRAFICA | 52 |
| 9 – APPENDICE | 70 |
| 9.1 Rassegna documenti aventi ad oggetto le funzioni dose-risposta per i materiali utilizzati in edilizia in funzione degli inquinanti e dei fenomeni atmosferici | 70 |
| 9.2 casi dei due edifici torinesi (Palazzo Mazzonis e Palazzo Madama), citati nei paragrafi precedenti | 91 |
| ALLEGATO: SCHEDE MATERIALI..... | 104 |

1 - GENERALITA' E SCOPO DEL LAVORO

La ricerca nasce in relazione alle richieste dei 4 Work Packages in cui è articolato il progetto CLIMAERA-ALCOTRA 2014-2020 che, nato dalla collaborazione di enti che si occupano di clima e atmosfera, ha tra i suoi obiettivi quello di migliorare la sensibilità delle amministrazioni locali e della popolazione sul tema dei cambiamenti climatici e dell'inquinamento atmosferico e sulle politiche di mitigazione necessarie, fornendo strumenti e metodi per migliorare la pianificazione a livello locale. Il WP4, oggetto della presente analisi, si concentra sulla valutazione dei costi/benefici delle strategie/misure in tema di adattamento ai cambiamenti climatici e qualità dell'aria; in particolare la sotto-azione 4.3 si pone, tra gli altri, l'obiettivo di valutare gli impatti dell'inquinamento atmosferico e dei cambiamenti climatici sul patrimonio culturale.

L'invecchiamento dei materiali è stato ed è tutt'oggi un processo naturale e irreversibile che colpisce tutti i manufatti edilizi in modo indiscriminato. Negli ultimi anni la crescente attenzione per la conservazione del patrimonio culturale, delle opere d'arte e delle facciate degli edifici storici (e non solo) ha portato ad affrontare il problema attraverso un punto di vista progressivamente sempre più scientifico. L'analisi e lo studio fungono sempre più da supporto nelle scelte prese durante le fasi di progettazione e di esecuzione del restauro, del recupero, della manutenzione e della valorizzazione dei manufatti stessi.

Oltre all'usura, le cause di degrado a cui sono soggetti i materiali possono essere di origine naturale (processi fisici, biologici, sbalzi termici, microclima, cristallizzazione salina, cicli di gelo/disgelo, etc) e/o antropica legate all'inquinamento atmosferico che aggredisce, trasformando o accelerando il processo di invecchiamento naturale. Negli ultimi decenni si è infatti assistito a un aumento del degrado sul patrimonio storico-artistico ed è da ritenere che una delle principali cause di tale processo sia proprio l'inquinamento atmosferico, che interviene sui processi degenerativi attraverso la modifica delle proprietà chimiche, fisiche e biologiche dell'aria, inducendo alterazioni di vario livello di gravità sui manufatti.

L'osservazione del fenomeno ha indotto il legislatore italiano a un'azione di tutela che si limita solamente alla salute umana e all'ecosistema, senza far riferimento alla salvaguardia del patrimonio storico-artistico (fatta eccezione per le opere d'arte esposte all'interno dei musei, per le quali si fa

riferimento al D.Lgs 112 del 1998).¹ La conoscenza di come gli inquinanti atmosferici influiscano sui processi di degrado e deterioramento degli edifici diventa importante non solo per il restauro e la protezione del patrimonio esistente, ma anche per indirizzare correttamente la scelta di materiali appropriati per le nuove costruzioni. Per questa ragione la ricerca scientifica si sta interrogando sul rapporto che lega patrimonio culturale e ambientale, tema attuale e dibattuto a tal punto che, negli anni passati, sono stati condotti a livello europeo progetti di ricerca finalizzati a valutare e quantificare il danno cui sono soggetti alcuni materiali che caratterizzano i beni culturali definendo delle funzioni dose-risposta (relazioni matematiche in grado di stimare il danno attribuibile agli inquinanti atmosferici e ai parametri climatici²).

Partendo da questi presupposti, il nostro lavoro si è posto come obiettivo quello di fornire elementi di valutazione delle conseguenze e degli impatti che il cambiamento climatico e l'inquinamento atmosferico hanno sul patrimonio culturale.

Approccio metodologico al tema

La metodologia operativa adottata, sviluppata in funzione del background culturale e lavorativo di ciascun membro dell'RTI, ha seguito schematicamente le seguenti fasi:

- **FASE A:** ricerca bibliografica in merito a:
 - processi e fattori di degrado dei materiali più comunemente utilizzati nell'edilizia storica legati a inquinamento atmosferico e meteorologia;
 - casi di studio centrati sulla tematica del degrado del patrimonio edilizio conseguente l'inquinamento e il cambiamento climatico;
 - funzioni dose-risposta;
 - interventi di conservazione e restauro.
- **FASE B:**
 - Individuazione e classificazione dei materiali trattati.
- **FASE C:**
 - Inquadramento sugli inquinanti e i fenomeni atmosferici responsabili del degrado.
 - Individuazione degli effetti degli inquinanti e dei fenomeni meteorologici: descrizione e individuazione di relazioni dose-risposta e delle problematiche poste dal loro impiego.

¹ BONANNI P., CACACE C., GIOVAGNOLI A., GADDI R., *Gli effetti dell'inquinamento atmosferico sui beni di interesse storico-artistico esposti all'aperto*, APAT – Dipartimento Stato dell'Ambiente e Metrologia ambientale, Servizio Inquinamento Atmosferico e Ambientale Urano, 2006.

² Bonanni P, Cacace C., Cattani G., Cusano M., De Santis A., Di Menno Di Bucchianico A., Gaddi R., GIOVAGNOLI A., Sarti C., *Valutazione degli effetti dell'inquinamento atmosferico sui beni culturali architettonici di Roma*, Rapporto ISPRA, 2011.

➤ **FASE D:**

- Individuazione dei danni attesi: l'argomento è stato sviluppato concentrando l'attenzione su due casi campione relativi al rame e al marmo e ai processi di degrado cui essi vanno soggetti.

➤ **FASE E:**

- Sono state affrontate le problematiche di conservazione, recupero e protezione delle superfici esterne di opere culturali, edifici e opere infrastrutturali in relazione ai fenomeni di inquinamento e al mutamento climatico. Il tema è stato sviluppato prendendo a campione due casi di particolare interesse per l'importanza delle opere e in quanto ben conosciuti e oggetto di studio da parte di componenti del gruppo (Officina delle idee srl), sui quali è stato possibile proporre una classificazione degli interventi di manutenzione, restauro, manutenzione e delle azioni di protezione preventiva e una stima parametrica dei costi medi e la loro incidenza annua.

2 - INDIVIDUAZIONE E CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI TRATTATI

Ai fini di poter comprendere in senso più ampio la fenomenologia del degrado dei materiali esposti all'aperto e come questi reagiscano agli stimoli dell'ambiente circostante, si è scelto di analizzare nello specifico 16 materiali impiegati comunemente nella costruzione e/o rivestimento delle architetture storiche e contemporanee e nei monumenti all'aperto.

Sulla base della loro natura - strettamente correlata alle loro fenomenologie di degrado - questi materiali presi a campione sono stati suddivisi in cinque macro-categorie:

Materiali lapidei naturali

arenarie e puddinghe
 granitoidi
 marmi e calcari
 rocce basiche e pietre verdi

Materiali lapidei artificiali

calcestruzzi e cementi, conglomerati cementizi armati
 gesso
 laterizio
 intonaci tradizionali
 vetro

Metalli e leghe

Acciaio
 alluminio
 bronzo
 piombo

rame

zinco

Materiali polimerici (polimeri, gomme, resine, polietilene, policarbonato)

Per ciascun materiale, attraverso l'analisi della fenomenologia del degrado, sono stati individuati i principali fattori di deterioramento. Bisogna però considerare che il degrado, nella realtà dei fatti, è quasi sempre causato dalla combinazione di più fattori, e che gli stessi effetti di alterazione come l'abrasione, l'erosione, la fessurazione, la scagliatura, la decoesione e l'incrostrazione, nella stragrande maggioranza dei casi costituiscono essi stessi un fattore di degrado o quantomeno una condizione catalitica per l'accelerazione dello stesso.

Per meglio descrivere in sintesi i materiali presi in esame, i fattori e i processi di degrado che li interessano **sono state prodotte delle schede tecniche** per ciascuno di essi (vedi allegato), nelle quali sono inoltre illustrate le dinamiche del degrado comuni alla maggior parte dei manufatti da essi costituiti. Più in particolare le schede sono state strutturate descrivendo:

- le caratteristiche del materiale (p.e. composizione, impieghi, morfologia, caratteristiche prestazionali);
- le fenomenologie generali e i fattori di degrado;
- le funzioni dose/risposta relative al fenomeno di arretramento superficiale note per il materiale (ove disponibili);
- gli interventi conservativi e le principali operazioni di manutenzione;
- bibliografia

3 - INQUINANTI E FENOMENI ATMOSFERICI OGGETTO DI TRATTAZIONE

Vengono sinteticamente descritti gli effetti dei principali agenti inquinanti e fenomeni atmosferici responsabili del degrado dei materiali da costruzione. I processi cui essi danno luogo sono descritti nelle **schede tecniche fornite in allegato. Uno schema sintetico di tali fattori di degrado e del loro effetto sui vari materiali è inoltre fornito dalla tabella allegata in coda al par. 4.2.**

Effetti sulla salute e sull'ambiente

Biossido di zolfo (SO₂)

Il biossido di zolfo è una sostanza fortemente nociva: esposizioni prolungate, anche a basse concentrazioni, provocano irritazione agli occhi e alle alte vie respiratorie. A concentrazioni elevate le patologie riguardanti l'apparato respiratorio possono diventare croniche.

La molecola di SO₂ combinandosi con l'ossigeno e l'umidità dell'aria tende a trasformarsi in acido solforico contribuendo all'acidificazione delle precipitazioni, con conseguenti effetti tossici per la vegetazione, acidificazione dei corpi idrici e compromissione della vita acquatica.

L'acidità delle precipitazioni può accelerare il degrado di molti materiali del patrimonio costruito e storico. Il calcare, alcuni marmi e i tufi sono i più sensibili all'azione corrosiva. Dalla fine del XIX secolo questi fenomeni sono stati osservati per la prima volta in Europa su molti monumenti lapidei ubicati in ambienti urbani a forte vocazione industriale.

Ossidi di azoto (NO₂, NO)

Hanno effetti negativi per la salute umana nell'aggravare alcune patologie quali l'asma, le malattie respiratorie croniche e le malattie cardiache. Sono anche responsabili di effetti irritanti per gli occhi.

I principali effetti sull'ambiente derivano dal contributo degli ossidi di azoto ai processi di eutrofizzazione e acidificazione delle precipitazioni, di acque dolci, di suoli forestali.

Le piogge acide sono responsabili della maggior parte dei fenomeni di degrado sui materiali e i manufatti.

Particolato atmosferico

Gli effetti principali del particolato per la salute umana derivano dall'inalazione delle particelle aerodisperse. Esse, in relazione alla dimensione granulometrica, possono penetrare più o meno profondamente nell'apparato respiratorio: procedendo dal naso o dalla bocca attraverso il tratto

tracheo-bronchiale, è pensabile che progressivamente si depositino con granulometria decrescente fino alle particelle più fini che possono raggiungere gli alveoli polmonari.

Le particelle possono permanere a lungo in atmosfera ed essere trasportate a lunga distanza dove possono depositarsi sul suolo o nell'acqua. Tra i principali effetti ambientali del particolato vi è la riduzione di visibilità. Ne sono responsabili soprattutto le particelle fini di origine secondaria. Il particolato può contribuire anche all'acidificazione della pioggia e alterare l'equilibrio nutrizionale nelle acque e nel suolo.

In funzione delle caratteristiche chimico-fisiche delle particelle, può produrre danni ai materiali, compromettendo la qualità del patrimonio culturale e del costruito. Su alcuni metalli il particolato può avere effetti corrosivi. Alcuni di questi effetti sono riconducibili alle piogge acide. Su alcune superfici può produrre un annerimento per deposizione meccanica e/o interazione con i materiali (pitture, vernici...).

Ozono

L'ozono contribuisce al degrado di molti materiali, tra i quali prodotti in gomma, il PVC (utilizzato in finestre e telai di porte, tubi e grondaie), nylon e poliestere, tessuti e altri materiali polimerici e rivestimenti superficiali.

L'ozono può anche agire indirettamente, accelerando alcuni processi di ossidazione e di produzione di solfati di calcio, dannosi per i materiali lapidei, quali i calcari. (1)

La riduzione dello strato di ozono troposferico comporta un aumento della radiazione UV che, a sua volta, esercita effetti negativi su molti materiali polimerici.

Fonti : (1) Guides géologiques régionaux- Paris et environs - P. Diffre, C. Pomerol - Ed Masson
 Revue " Pollution atmosphérique " - De la pollution atmosphérique sur les matériaux - numéro spécial- octobre 2007.

Anomalie climatiche

L'esperienza nell'ambito della manutenzione conservativa e del restauro di edifici di rilevanza storica, architettonica e/o culturale maturata nel corso degli anni dai sottoscritti professionisti, porta oggi a prendere in considerazione i sempre più frequenti episodi meteorologici estremi legati ai cambiamenti climatici in atto, per la gravità dei danni arrecati alle strutture.

Se in passato infatti il problema principale nel degrado dei manufatti era fortemente connesso all'inquinamento atmosferico e alla sua interazione con i parametri meteorologici, oggi si evidenzia un'altra vulnerabilità dei manufatti: in modo via via più marcato infatti emerge che parti strutturali di edifici storici, che hanno resistito per secoli alle intemperie, non sono più idonei a fronteggiare eventi con precipitazioni molto intense, che sono più caratteristici di un clima monsonico.

Si rivelano particolarmente sensibili e fragili alcuni elementi architettonici, quali le vetrate, i serramenti, elementi decorativi, i cornicioni, le falde dei tetti, i lucernai

Vale dunque la pena di tenere sotto controllo questi episodi estremi in quanto non possono più essere considerati come eventi anomali ma sempre più saranno una costante meteorologica.

Poiché assistiamo ad un generale miglioramento, nell'area di studio ALCOTRA, dei livelli di concentrazione in aria di quegli inquinanti che hanno rappresentato i principali aggressori del costruito nel secolo scorso e principalmente il biossido di zolfo e le polveri aerodisperse, **si ritiene oggi importante affiancare, nella valutazione del degrado dei manufatti, anche l'evoluzione delle condizioni climatiche.** Da questo punto di vista indici sintetici, quali gli indici di precipitazione estremi, forniranno indicazioni utili sia per calibrare gli interventi di manutenzione degli edifici, sia nella fase di progettazione e realizzazione di nuovi fabbricati.

4 - EFFETTI SUI MATERIALI DEGLI INQUINANTI ATMOSFERICI E DEI FENOMENI METEOCLIMATICI: DESCRIZIONE E INDIVIDUAZIONE DI FUNZIONI DI RELAZIONE CAUSA-EFFETTO E DOSE-RISPOSTA

4.1 Descrizione e individuazione di funzioni dose/risposta

Punto fondamentale del presente lavoro è stata la ricerca bibliografica relativa a funzioni dose-risposta che legano inquinanti e materiali utilizzati in edilizia. Le ricerche effettuate hanno consentito di trovare numerosi articoli scientifici che riportano funzioni di questo tipo.

Si parte dai primi studi che risalgono agli anni 1970 per passare poi a studi coordinati come **“International Co-operative Programme on Effects on Materials, including Historic and Cultural Monuments”** UNECE, **progetto UE MULTI-ASSESS**, ecc. svolti dapprima in particolare per SO₂ e poi perfezionati per multi-inquinanti.

Le funzioni dose-risposta risultano però difficilmente applicabili ai singoli casi reali. Trattandosi generalmente di valori ottenuti sperimentalmente sulla base di numerosi campioni testati in situazioni molto diverse rappresentano una “media” e da questa si discostano più o meno i casi reali. Inoltre le modalità di prova utilizzate sono molto semplificate in quanto le misure vengono fatte su singole lastre di materiale esposte all'aperto mentre le situazioni reali si presentano molto più complesse sia per forma e dimensione dei materiali che per la presenza di più materiali diversi. Inoltre studi su singole situazioni dimostrano che è molto forte l'influenza di fattori locali quali esposizione, direzione dei venti, l'intensità della pioggia, radiazione solare....., fattori che variano anche su un singolo edificio in funzione dell'esposizione delle pareti. Gli studi delle funzioni dose-risposta hanno quindi una valenza molto generale, sicuramente utile a meglio comprendere gli effetti degli inquinanti e dei fattori meteorologici sul degrado dei materiali ma non sono generalmente applicabili a singoli casi specifici.

Esistono poi studi che si basano su metodologie molto più complesse (flusso dei liquidi all'interno della porosità dei materiali e conseguente distribuzione degli agenti inquinanti) ma la loro applicazione è molto complessa e ancora a livello sperimentale.

Servizio di impostazione di una metodologia di valutazione degli impatti sul patrimonio culturale ed edilizio derivanti dalle misure individuate nell'ambito dell'azione WP4 del progetto ALCOTRA Climaera
– Per conto della Sezione Aria e Atmosfera – ARPA Valle d'Aosta -

FORMULE DOSE-RISPOSTA

Si riporta una selezione di formule per le categorie di materiali seguenti:

MATERIALI LAPIDEI NATURALI
MATERIALI LAPIDEI ARTIFICIALI
METALLI E LEGHE
MATERIALI ORGANICI

ARENARIE - PUDDINGHE

Brimblecombe, Grossi (2010)

Pietra

$$-dx/dt = Lv \cdot Rn + 0.016[H^+]Rn + 0.18(VdS SO_2(g) + VdN HNO_3(g))$$

$$-dx/dt = \text{tasso di recessione, } \mu m a^{-1}$$

Lv = valore di Lipfert, in genere impostato a 18,8 μm (recessione) m^{-1} (precipitazione), o regolato per modificare la temperatura e la pressione parziale di CO_2

Rn = pioggia in $m a^{-1}$ (presa come pioggia, non precipitazione, perché la neve è meno efficace per la dissoluzione)

V_{dS} e V_{dN} = velocità di deposizione ($0,38$ e $0,32 \text{ cm sec}^{-1}$)

$SO_2(g)$ e $HNO_3(g)$ = concentrazioni, $\mu g m^{-3}$

$[H^+]$ = concentrazione di ioni H^+ nell'acqua piovana, $\mu mol l^{-1}$

Kucera (2004)

White Mansfiel dolomitic sandstone

$$R = 2.0[SO_2]^{0.52} \exp\{f(T)^{0.91} + 0.028 \text{Rain}[H^+]t^{0.91}\}$$

$$f(T) = 0 \text{ when } T \leq 10^\circ C, \text{ otherwise } -0.013(T-10)$$

$$r^2 = 0.86 \quad N = 101$$

R = surface recession, μm

t = exposure time, years

T = temperature, $^\circ C$ - annual average

$[SO_2]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average

Rain = amount of precipitation, $m year^{-1}$ – annual average

$[H^+]$ = concentration, $mg l^{-1}$ – annual average

r^2 = coefficiente di correlazione

N = numero di siti coinvolti nell'analisi

Warkiss, Eyre, Holland, Rabl, Short (2000)

Arenaria calcarea o malta non riparata

ICP - unsheltered calcareous sandstone or mortar (4 years), stage II:

$$ML = 7.3 + 1.56.TOW.SO_2 + 0.12.H^+$$

Arenaria riparata

$$MI = 0.71 + 0.22.TOW.SO_2$$

ICP - sheltered sandstone (4 years), stage III (without later damages such as exfoliation):

TOW = fraction of time relative humidity exceeds 80% and temperature $>0^\circ\text{C}$

SO_2 = sulphur dioxide concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$

H^+ = acidity, $\text{meq}/\text{m}^2/\text{year}$

GRANITOIDI

Brimblecombe, Grossi (2010)

Pietra

$$-dx/dt = Lv \cdot Rn + 0.016[H^+]Rn + 0.18(VdS SO_2(g) + VdN HNO_3(g))$$

$$-dx/dt = \text{tasso di recessione, } \mu m a^{-1}$$

Lv = valore di Lipfert, in genere impostato a $18,8 \mu m$ (recessione) m^{-1} (precipitazione), o regolato per modificare la temperatura e la pressione parziale di CO_2

Rn = pioggia in $m a^{-1}$ (presa come pioggia, non precipitazione, perché la neve è meno efficace per la dissoluzione)

V_{dS} e V_{dN} = velocità di deposizione ($0,38$ e $0,32 cm sec^{-1}$)

$SO_2(g)$ e $HNO_3(g)$ = concentrazioni, $\mu g m^{-3}$

$[H^+]$ = concentrazione di ioni H^+ nell'acqua piovana, $\mu mol l^{-1}$

MARMI E CALCARI

Christodoulakis, Tzanis, Varotsos, Ferm, Tidblad (2016)

$$R = 4 + 0.002[SO_2]Rh_{60} + 0.054Rain[H^+] + 0.05[HNO_3]Rh_{60} + 0.106PM_{10}$$

R = surface recession per year, μm (absolute value)

$[SO_2]$ = annual average concentration, $\mu g m^{-3}$

Rh = annual average of relative humidity (%), $Rh_{60} = Rh - 60$ when $Rh > 60$, 0 otherwise

$Rain$ = amount of precipitation, $\mu g m^{-3}$

$[H^+]$ = annual average concentration, $mg L^{-1}$

$[HNO_3]$ = annual average concentration, $\mu g m^{-3}$

$[PM_{10}]$ = annual average concentration, $\mu g m^{-3}$

Kucera et al. (2007)

Multiassess1 (Model for multi-pollutant impact and assessment of threshold levels for cultural heritage)

$$R = 4 + 0.0059 \cdot [SO_2] \cdot Rh_{60} + 0.054 \cdot Rain \cdot [H^+] + 0.078 \cdot [HNO_3] \cdot Rh_{60} + 0.0258 \cdot [PM_{10}]$$

R = recessione superficiale, $\mu m/anno$

$[SO_2]$ = concentrazione di biossido di zolfo, $\mu g/m^3$

$[HNO_3]$ = concentrazione di acido nitrico, $\mu g/m^3$

$[PM_{10}]$ = concentrazione di particolato atmosferico, $\mu g/m^3$

Rh_{60} = umidità relativa Rh-60, %

$[H^+]$ = concentrazione di ioni idrogeno, mg/l

$Rain$ = precipitazioni, $mm/anno$

in particolare:

- 4: valore calcolato sperimentalmente che rappresenta il degrado in assenza di inquinanti
- $0.054 \cdot Rain \cdot [H^+]$: effetto della pioggia acida
- $0.0059 \cdot [SO_2] \cdot Rh_{60}$: deposizione di SO_2

Warkiss, Eyre, Holland, Rabl, Short (2000)

Calcare non riparato

$$ML = 8.6 + 1.49.TOW.SO_2 + 0.097.H^+$$

Calcare riparato

$$MI = 0.59 + 0.20.TOW.SO_2$$

TOW = fraction of time relative humidity exceeds 80% and temperature $>0^\circ\text{C}$

SO_2 = sulphur dioxide concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$

H^+ = acidity, $\text{meq}/\text{m}^2/\text{year}$

Lipfert (1989)

$$L = 18.8R + 0.016(H^+)R + 0.18(V_{ds}[SO_2] + V_{dN}[HNO_3])$$

L = recessione superficiale, $\mu\text{m}/\text{anno}$

18.8 = solubilità del CaCO_3 in equilibrio con 330 ppm CO_2

R = precipitazione annua, m/anno

0.016 = costante valida per precipitazioni con pH 3-5

$[H^+]$ = concentrazione di ioni idrogeno valutata in base al pH medio annuo, ion/l

0.18 = fattore di conversione da $(\text{cm}/\text{s}) (\mu\text{g}/\text{m}^3)$ a μm

V_{ds} = velocità di deposizione di SO_2 , cm/s

$[SO_2]$ = concentrazione di SO_2 , $\mu\text{g}/\text{m}^3$

V_{dN} = velocità di deposizione di HNO_3 , cm/s

$[HNO_3]$ = concentrazione di HNO_3 , $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Vladimir Kucera & Johan Tidblad & Katerina Kreislova & Dagmar Knotkova & Markus Faller & Daniel Reiss & Rolf Snethlage & Tim Yates & Jan Henriksen & Manfred Schreiner & Michael Melcher & Martin Ferm & Roger-Alexandre Lefèvre & Joanna Kobus

(2007)

$$R = 3.1 + t(0.85) + 0.0059 Rh_{60} [SO_2] + 0.078 Rh_{60} [HNO_3] + 0.054 Rain [H^+] + 0.0258 PM_{10}$$

ML = mass loss, $g m^{-2}$

t = exposure time, years

Rh_{60} = relative humidity, % - annual average; = (Rh -60)

when Rh > 60; otherwise 0

T = temperature, °C - annual average

$[SO_2]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average

$[H^+]$ = concentration, $mg l^{-1}$ - annual average

$[HNO_3]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average

$[Cl^-]$ = concentration, $mg l^{-1}$ - annual average

PM₁₀ PM concentration $\mu g m^{-3}$ (<10 μm)

Rain Amount of precipitation $mm year^{-1}$

INTONACO

Warkiss, Eyre, Holland, Rabl, Short (2000)

Arenaria calcarea o malta non riparata

$$ML = 7.3 + 1.56.TOW.SO_2 + 0.12.H^+$$

TOW = fraction of time relative humidity exceeds 80% and temperature >0°C

SO₂ = sulphur dioxide concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$

H⁺ = acidity, $\text{meq}/\text{m}^2/\text{year}$

ACCIAIO

Christodoulakis, Tzanis, Varotsos, Ferm, Tidblad (2016)

Carbon steel

$$ML = 51 + 1.39[SO_2]^{0.6}Rh_{60}e^{f(T)}$$

$$f(T) = 0.015(T-10) \text{ when } T < 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.054(T-10) \text{ when } T \geq 10^\circ\text{C}$$

Carbon steel for Athens

$$ML = 10 + 0.012[SO_2]^{2.152}Rh_{60}e^{f(T)} + 1.29Rain[H^+] + 1.263PM_{10}$$

$$f(T) = 0.15(T-10) \text{ when } T < 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.054(T-10) \text{ when } T \geq 10^\circ\text{C}$$

$$ML = \text{mass loss by corrosion, } g m^{-2}$$

$$[SO_2] = \text{annual average concentration, } \mu g m^{-3}$$

$$Rh = \text{annual average of relative humidity (\%)}, Rh_{60} = Rh - 60 \text{ when } Rh > 60, 0 \text{ otherwise}$$

$$T = \text{annual average temperature, } ^\circ\text{C}$$

$$Rain = \text{amount of precipitation, } \mu g m^{-3}$$

$$[H^+] = \text{annual average concentration, } mg L^{-1}$$

Warkiss, Eyre, Holland, Rabl, Short (2000)

Zinco e acciaio galvanizzato non riparati

ICP - unsheltered zinc (4 years):

$$ML = 14.5 + 0.043.TOW.SO_2.O_3 + 0.08.H^+$$

$$ML = \text{mass loss, } g/m^2 \text{ after 4 years}$$

$$TOW = \text{fraction of time relative humidity exceeds 80\% and temperature } > 0^\circ\text{C}$$

$$SO_2 = \text{sulphur dioxide concentration, } \mu g/m^3$$

$$O_3 = \text{ozone concentration, } \mu g/m^3$$

$$H^+ = \text{acidity, } meq/m^2/year$$

Kucera (2004)

Weathering steel (C<0,12%, Mn 0.3-0.8%, Si 0.25-0.7%, P 0.07-0.15%, S<0.04%, Cr 0.5-1.2%, Ni 0.3-0.6%, Cu 0.3-0.55%, Al<0.01%)

$$ML = 34[SO_2]^{0.33} \exp\{0.020Rh\} 34[SO_2]^{0.13} \exp\{0.020Rh + f(T)\} t^{0.33}$$

$$f(T) = 0.059(T-10) \text{ when } T \leq 10^\circ\text{C, otherwise } -0.036(T-10)$$

$$r^2 = 0.68 \quad N = 148$$

ML = mass loss, $g\ m^{-2}$

t = exposure time, years

Rh = relative humidity, % - annual average

T = temperature, $^\circ\text{C}$ - annual average

$[SO_2]$ = concentration, $\mu\ g\ m^{-3}$ - annual average

r^2 = coefficiente di correlazione

N = numero di siti coinvolti nell'analisi

Warkiss, Eyre, Holland, Rabl, Short (2000)

Zinco e acciaio galvanizzato non riparati

ICP - unsheltered zinc (4 years):

$$ML = 14.5 + 0.043.TOW.SO_2.O_3 + 0.08.H^+$$

ML = mass loss, g/m^2 after 4 years

TOW = fraction of time relative humidity exceeds 80% and temperature $>0^\circ\text{C}$

SO_2 = sulphur dioxide concentration, $\mu\text{g}/m^3$

O_3 = ozone concentration, $\mu\text{g}/m^3$

H^+ = acidity, $meq/m^2/year$

ALLUMINIO

Brimblecombe, Grossi (2010)

$$\Delta mt = 0.0021[SO_2(g)]^{0.23}RH \exp(fAl)t^{1.2} + 0.023Rn c_{Cl} t$$

$fAl = 0,031 (T-10)$ quando $T < 10^\circ C$ e $-0,061 (T-10)$ a $T > 10^\circ C$,

c_{Cl} = concentrazione di ione cloruro ($mg\ l^{-1}$) nell'acqua piovana

t = tempo in anni

Kucera (2004)

$$ML = 0.0021[SO_2]^{0.23} Rh \cdot \exp\{f(T)\}t^{3.2} + 0.00023Rain\{Cl\}t$$

$f(T) = 0.083(T-10)$ when $T \leq 10^\circ C$, otherwise $-0.032(T-10)$

$r^2 = 0.74$ N 106

ML = mass loss, $g\ m^{-2}$

t = exposure time, years

Rh = relative humidity, % - annual average

T = temperature, $^\circ C$ - annual average

$[SO_2]$ = concentration, $\mu g/m^3$ - annual average

$[O_3]$ = concentration, $\mu g/m^3$ - annual average

r^2 = coefficiente di correlazione

N = numero di siti coinvolti nell'analisi

BRONZO

Kucera (2004)

Bronze: Cu Sn6Pb7Zn5, ISO/R 1338 (Cu 81%, Sn 5.8%, Pb 6.7%, Zn 4.5%, Ni 1.6% + trace elements)

$$ML = 0.026[SO_2]^{0.44} Rh \exp\{f(T)\}t^{0.86} + 0.029Rain[H^+]t^{0.76} + 0.00043Rain[Cl]t^{0.76}$$

$$f(T) = 0.060(T-11) \text{ when } T \leq 11^\circ\text{C, otherwise } -0.067(T-11)$$

$$r^2 = 0.81 \quad N = 144$$

$$ML = \text{mass loss, } g \text{ m}^{-2}$$

t = exposure time, years

Rh = relative humidity, % - annual average

T = temperature, °C - annual average

$[SO_2]$ = concentration, $\mu g \text{ m}^{-3}$ - annual average

$[H^+]$ = concentration, $mg \text{ l}^{-1}$ - annual average

$[Cl]$ = concentration, $mg \text{ l}^{-1}$ - annual average

r^2 = coefficiente di correlazione

N = numero di siti coinvolti nell'analisi

Vladimir Kucera & Johan Tidblad & Katerina Kreislova & Dagmar Knotkova & Markus Faller & Daniel Reiss & Rolf Sneathlage & Tim Yates & Jan Henriksen & Manfred Schreiner & Michael Melcher & Martin Ferm & Roger-Alexandre Lefèvre & Joanna Kobus

(2007)

$$ML = 1.33 + t (0.00876 [SO_2] e^{f(T)} Rh_{60} + 0.0409 Rain[H^+] + 0.038 PM_{10})$$

$$ML = \text{mass loss, } g \text{ m}^{-2}$$

t = exposure time, years

Rh_{60} = relative humidity, % - annual average; = (Rh - 60)

when $Rh > 60$; otherwise 0

T = temperature, °C - annual average

$[SO_2]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average

$[H^+]$ = concentration, $mg l^{-1}$ - annual average

$[Cl^-]$ = concentration, $mg l^{-1}$ - annual average

PM10 PM concentration $\mu g m^{-3}$ (<10 μm)

Rain Amount of precipitation $mm year^{-1}$

RAME

Christodoulakis, Tzanis, Varotsos, Ferm, Tidblad (2016)

$$ML = 4.21 + 0.00201[SO_2]^{0.4}[O_3]Rh_{60}e^{f(T)} + 0.0878Rain[H^+]$$

$f(T) = 0.059(T-10)$ when $T \leq 10^\circ C$, otherwise $-0.036(T-10)$ when $T > 10^\circ C$

ML = mass loss by corrosion, $g m^{-2}$

$[SO_2]$ = annual average concentration, $\mu g m^{-3}$

$[O_3]$ = annual average concentration, $\mu g m^{-3}$

Rh = annual average of relative humidity (%), $Rh_{60} = Rh - 60$ when $Rh > 60$, 0 otherwise

T = annual average temperature, °C

$Rain$ = amount of precipitation, $\mu g m^{-3}$

$[H^+]$ = annual average concentration, $mg L^{-1}$

Brimblecombe, Grossi (2010)

Funzione di perdita di massa in aree non riparate (Δmt)

$$\Delta mt = 0.0027SO_{2(g)}^{0.32} O_{3(g)}^{0.79} RH \exp(f_{Cu})t^{0.78} + 0.05Rn[H^+]t^{0.89}$$

$f_{Cu} = 0.083(T-10)$ quando $T < 10^\circ C$ e $-0.032(T-10)$ con $T > 10^\circ C$

Funzione di perdita di massa in aree riparate ($\Delta m'_i$)

$$\Delta m'_i = 0.00045 SO_{2(g)}^{0.28} O_{3(g)} 1.16 RH \exp(f'_{cu}) t^{0.78}$$

$$f'_{cu} = 0.033(T-10) \text{ quando } T < 10^\circ\text{C} \text{ e } -0.019(T-10) \text{ con } T > 10^\circ\text{C}.$$

Funzione di MULTI-ASSESS

$$\Delta m_t = 3.12 + (1.09 + 0.002 SO_{2(g)}^{0.4} O_{3(g)} RH_{60} \exp(f_{cu}) + 0.0878 Rn[H^+]) t$$

$$RH_{60} = RH - 60 \text{ con } RH > 60$$

Kucera (2004)

$$ML = 0.0027 [SO_2]^{0.32} [O_3]^{0.79} Rh \cdot \exp\{f(T)\} t^{0.78} + 0.050 Rain\{H^+\} t^{0.89}$$

$$f(T) = 0.083(T-10) \text{ when } T \leq 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.032(T-10)$$

$$r^2 \text{ 0.73 N 95}$$

ML = mass loss, $g m^{-2}$

t = exposure time, years

Rh = relative humidity, % - annual average

T = temperature, $^\circ\text{C}$ - annual average

$[SO_2]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average

$[O_3]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average

r^2 = coefficiente di correlazione

N = numero di siti coinvolti nell'analisi

Vladimir Kucera & Johan Tidblad & Katerina Kreislova & Dagmar Knotkova & Markus Faller & Daniel Reiss & Rolf Snethlage & Tim Yates & Jan Henriksen & Manfred Schreiner & Michael Melcher & Martin Ferm & Roger-Alexandre Lefèvre & Joanna Kobus

(2007)

$$ML = 3.12 + t (1.09 + 0.00201 [SO_2]^{0.4} [O_3] Rh_{60} e^{T(T)} + 0.0878 Rain [H+])$$

ML = mass loss, g/m^2

Time t years

Temperature T °C

Rh_{60} = relative humidity, % - annual average; = (Rh -60)

when $Rh > 60$; otherwise 0

Amount of precipitation Rain $mm\ year^{-1}$

Acidity of precipitation [H+] $mg\ l^{-1}$

SO₂ concentration [SO₂] $\mu g\ m^{-3}$

O₃ concentration [O₃] $\mu g\ m^{-3}$

ZINCO

Brimblecombe, Grossi (2010)

Funzione di perdita di massa in aree non riparate (Δm_t)

$$\Delta m_t = 1.35 SO_{2(g)}^{0.22} \exp(0.01RH + f_{zn}) t^{0.85} + 0.029 Rn[H^+] t^{0.89}$$

$$f_{zn} = 0.062(T-10) \text{ quando } T < 10^\circ\text{C} \text{ e } -0.021(T-10) \text{ con } T > 10^\circ\text{C}$$

Funzione di perdita di massa in aree riparate ($\Delta m'_t$)

$$\Delta m'_t = 0.058 SO_{2(g)}^{0.16} RH \exp(f'_{zn}) t^{0.49}$$

$$f'_{zn} = 0.039(T-10) \text{ quando } T < 10^\circ\text{C} \text{ e } -0.034(T-10) \text{ con } T > 10^\circ\text{C}$$

Funzione di MULTI-ASSESS

$$\Delta m_t = 1.82 + (1.71 + 0.471 SO_{2(g)}^{0.22} \exp(0.018RH) \exp(f_{zn}) + 0.041 Rn[H^+] + 1.37 HNO_{3(g)}) t$$

Kucera (2004)

$$ML = 1.4 [SO_2]^{0.22} \exp\{0.018Rh + f(T)\} t^{0.85} + 0.029 Rain[H^+] t$$

$$f(T) = 0.062(T-10) \text{ when } T \leq 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.021(T-10)$$

$$r^2 = 0.84 \text{ N } 98$$

ML = mass loss, $g m^{-2}$

t = exposure time, years

Rh = relative humidity, % - annual average

T = temperature, $^\circ\text{C}$ - annual average

$Rain$ = amount of precipitation, $m year^{-1}$ - annual average

$[H^+]$ = concentration, $mg l^{-1}$ - annual average

$[SO_2]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average

r^2 = coefficiente di correlazione

N = numero di siti coinvolti nell'analisi

Warkiss, Eyre, Holland, Rabl, Short (2000)

Zinco e acciaio galvanizzato non riparati

ICP - unsheltered zinc (4 years):

$$ML = 14.5 + 0.043.TOW.SO_2.O_3 + 0.08.H^+$$

Zinco riparato

ICP - sheltered zinc (4 years):

$$ML = 5.5 + 0.013.TOW.SO_2.O_3$$

ML= mass loss, g/m^2 after 4 years

TOW= fraction of time relative humidity exceeds 80% and temperature $>0^\circ C$

SO₂= sulphur dioxide concentration, $\mu g/m^3$

O₃= ozone concentration, $\mu g/m^3$

H⁺= acidity, $meq/m^2/year$

VETRO

Christodoulakis, Tzanis, Varotsos, Ferm, Tidblad (2016)

Modern glass

$$H = \{0.2212[SO_2] + 0.1367[NO_2] + 0.1092PM_{10}\} / [1 + (382/t)^{1.86}]$$

Modern glass from Athens

$$H = \{0.204[SO_2] + 0.016[NO_2] + 0.319PM_{10}\} / [1 + (382/t)^{1.86}]$$

H = haze, %

$[SO_2]$ = annual average concentration, $\mu g m^{-3}$

$[NO_2]$ = annual average concentration, $\mu g m^{-3}$

$[PM_{10}]$ = annual average concentration, $\mu g m^{-3}$

t = exposure time, *days*

POLIMERI

Brimblecombe, Grossi (2010)

Gomma

$$1 / tc = re + kO_3 O_3$$

$1 / tc$ = reciproco del tempo per la prima comparsa di crepe. Il parametro kO_3 è una costante di velocità e O_3 è la concentrazione di ozono in ppb. I valori re e kO_3 dipendono entrambi dal tipo di gomma e dal fatto che la formazione di crepe sia considerata ai bordi o meno.

Kucera (2004)

Acciaio galvanizzato rivestito con melamina alchidica

$$L = [5/(0.084[SO_2] + 0.01Rh + f(T) + 0.00082Rain)]^{1/0.43}$$

$$f(T) = 0.040(T-10) \text{ when } T \leq 10^\circ\text{C, otherwise } -0.064(T-10)$$

$$r^2 \text{ 0.73 } \quad N \text{ 138}$$

Pannelli in acciaio con resine alchidiche

$$L = [5/(0.033[SO_2] + 0.013Rh + f(T) + 0.0013Rain)]^{1/0.41}$$

$$f(T) = 0.040(T-10) \text{ when } T \leq 10^\circ\text{C, otherwise } -0.064(T-10)$$

$$r^2 \text{ 0.68 } \quad N \text{ 139}$$

L = maintenance interval (life time), *year*

Rh = relative humidity, % - annual average

T = temperature, $^\circ\text{C}$ - annual average

$[SO_2]$ = concentration, $\mu \text{ g m}^{-3}$ - annual average

$Rain$ = amount of precipitation, $m \text{ year}^{-1}$ - annual average

r^2 = coefficiente di correlazione

N = numero di siti coinvolti nell'analisi

4.2 Problematiche relative all'applicazione delle funzioni dose/risposta

Come già evidenziato all'inizio del paragrafo, un primo limite dei metodi statistici basati sulla determinazione del rapporto dose/effetto è che, per ottenere risultati in grado di descrivere validamente i fenomeni, **essi richiedono un'elevata mole di dati, spesso non facilmente reperibili. Essi inoltre forniscono risultati fortemente mediati nello spazio e nel tempo.** Per cercare di superare questi limiti, **sono state proposte differenti metodiche di studio:** Appolonia et al. 2009 (vedi sintesi nella rassegna bibliografica) si sono concentrati sulla problematica del processo di solfatazione (formazione di croste nere) e hanno evidenziato che è possibile affrontare più efficacemente il problema sviluppando **nuovi modelli basati sull'analisi numerica e il confronto dei dati ottenuti sperimentalmente**, al fine di descrivere lo sviluppo del processo di degrado nel tempo.

Altra problematica legata all'impiego di queste metodiche, come facilmente riscontrabile dalla disamina relativa ai vari materiali contenuta nelle schede tecniche relative a ciascun materiale, sta nel fatto che le dinamiche del degrado sono spesso legate a fattori non sempre presi in considerazione dalle funzioni dose-risposta, che si rivelano però altrettanto importanti nel determinare l'erosione

superficiale del materiale e che pertanto dovrebbero essere oggetto di studio per definirne l'entità dei processi di degrado.

Bisogna sottolineare inoltre che **la recessione superficiale non costituisce sempre il più grave fenomeno di degrado**, anzi risulta indicativa solo quando si tratta di materiali compatti e omogenei come metalli e marmi ed escludendo tra questi molti materiali polimerici. Per quanto concerne i materiali disomogenei, porosi, compositi o agglomerati, la morfologia della loro struttura e le caratteristiche della porosità e permeabilità sono determinanti per definirne il comportamento rispetto ai fattori esterni.

Pertanto, se nella prima categoria di materiali il fenomeno di degrado più comune è la progressiva perdita di materiale superficiale (per abrasione, ossidazione, decoesione...), **nella seconda i fenomeni che causano maggiori perdite sono il distacco, la fessurazione, fratturazione e caduta di porzioni più significative, non prevedibili con accuratezza e non misurabili in nm/anno.**

I fenomeni atmosferici che incidono maggiormente sul degrado di quest'ultima categoria sono la pioggia battente, specie se seguita da vento d'attrito (secco) o forte irraggiamento solare con conseguente rapida riduzione dell'umidità all'interno dei pori ("evaporazione violenta") e i cicli di gelo e disgelo.

L'associazione di precipitazioni e correnti eoliche causa un'elevata e disomogenea imbibizione delle superfici verticali, non sempre idonee a ricevere un tale quantitativo di acqua. Gli stessi risultati si raggiungono anche in assenza di vento, nei casi di forti precipitazioni, ove i sistemi di scarico delle acque meteoriche non risultano sufficienti. **Questi episodi meteorologici, sempre più frequenti nella stagione estiva, non necessariamente influiscono sulla quantità di acqua precipitata nel corso dell'anno. Le funzioni di arretramento superficiale finora applicate prendono però in considerazione proprio il dato relativo alle precipitazioni annue (in metri o millimetri). Appurata la correlazione fra precipitazioni violente e degrado, resta quindi il problema di definire come e in quale misura questo dato influisce sull'arretramento superficiale.**

Riguardo ai fenomeni di gelo, bisogna ricordare che le temperature misurate all'aperto spesso non coincidono con quelle di superficie, specie quando il materiale conserva una certa inerzia termica o è a contatto con un edificio riscaldato. Inoltre, altri fattori devono essere presi in considerazione per valutare la disgregazione del materiale per gelo: è necessario che venga raggiunto il grado di saturazione critico e che il congelamento avvenga in tempi brevi. Nello specifico, il congelamento, perché si verifichi la disgregazione, dovrebbe avvenire prima che l'acqua - ancora libera all'interno dei pori - possa essere naturalmente spinta verso le vie di uscita per pressione idraulica dei primi germi cristallini, come espresso dalla legge di Darcy:

$$dV/(dt) = k \cdot A \cdot \Delta P/L$$

dove ΔP è la differenza tra la pressione idraulica che si genera dove si forma il ghiaccio (P_1) e quella atmosferica (P_2); L è il cammino che l'acqua non ancora solidificata deve percorrere fino a fuoriuscire o trovare una cavità vuota che si trova alla pressione atmosferica; A è la sezione dei pori attraverso cui l'acqua liquida viene spinta; dV/dt è il flusso dell'acqua che coincide con l'aumento di volume nel tempo determinato dalla formazione di ghiaccio, che a sua volta dipende dalla velocità con cui il ghiaccio si forma e quindi dipende dalla velocità di abbassamento della temperatura ambientale al di sotto di 0°C ; K , infine, è il cosiddetto coefficiente di permeabilità che, a sua volta, dipende non tanto e non solo dalla porosità totale del materiale solido, quanto invece dalla distribuzione dimensionale dei

pori: infatti, a parità di volume, un fascio di molti pori di piccola dimensione fa fluire l'acqua più lentamente che non un unico grande poro.

Il degrado della seconda categoria di materiali è quindi fortemente influenzato dai parametri fisici e in particolar modo dalle loro variazioni nel tempo: è regola generale che più repentina sarà la variazione dei parametri di umidità e temperatura, maggiori saranno gli stress a carico del materiale e più disastrosi gli effetti del degrado; tuttavia la complessità dei fenomeni e la moltitudine dei dati di cui si deve tener conto, non ci permettono di prevedere con precisione entro quali parametri termici o igrometrici si verifichino passaggi di stato dell'acqua pericolosi per tutti materiali porosi. Possono essere però presi in esame le tempistiche degli andamenti climatici e la ricorrenza delle correnti eoliche, che incidono certamente su questi fenomeni.

Con l'intento di operare una classificazione dei fattori di degrado sui materiali trattati e considerando che non sempre è possibile reperire una funzione di calcolo che ci permetta di fare una valutazione matematica del progressivo ammaloramento, è stata proposta nella tabella sottoriportata una stima dell'incidenza dei vari fattori, sulla base della ricerca bibliografica e dell'esperienza maturata dall'equipe su differenti casi-studio.

Nella tabella sono stati quindi suddivisi i fattori di degrado esaminati per i singoli materiali, operando delle generalizzazioni per includere tutte le categorie trattate.

| MATERIALE | AGENTI CHIMICI | | | | | | AGENTI FISICI | | | | | |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|------------------|--------------|--------------|-------------|---------|
| | SO _x | NO _x | O ₃ | PM _x | Cl ⁻ | CO ₂ | Pioggia | Correnti eoliche | Gelo/disgelo | Raggi solari | Temperatura | Umidità |
| MATERIALI LAPIDEI NATURALI | | | | | | | | | | | | |
| Arenarie a cemento calcareo | OOO | OOO | O | O | OO | OOO | OOO | OO | OOO | OO | OOO | OOO |
| Granitoidi | O | O | O | O | O | O | OO | O | O | / | OO | OO |
| Marmi - calcari | OOO | OO | / | OOO | OO | OOO | OOO | OOO | OOO | O | OOO | OOO |
| Rocce basiche | OO | O | / | O | O | O | OO | O | O | / | O | OOO |
| MATERIALI LAPIDEI ARTIFICIALI | | | | | | | | | | | | |
| Gesso | OOO | OOO | / | OOO | OO | O | OOO | O | OOO | O | O | OOO |
| Intonaci tradizionali | OOO | OOO | / | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OO | OOO |
| Cemento | OOO | O | OO | OOO | / | OOO | OOO | O | OO | O | O | OOO |
| Laterizio | OO | O | / | OOO | O | O | OO | OO | OOO | OO | O | OOO |
| Vetro | OOO | OOO | / | OOO | O | OOO | OOO | OOO | O | OO | OOO | OOO |
| METALLI E LEGHE | | | | | | | | | | | | |
| Rame | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OO | / | / | O | OO | OOO |
| Bronzo | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OOO | OO | / | / | O | OO | OOO |
| Alluminio | O | O | O | O | O | O | OO | / | / | / | OOO | OO |
| Acciaio (non inox) | OOO | O | OO | OOO | O | O | OOO | / | / | / | OO | OOO |
| Zinco | OOO | OOO | / | O | / | / | OOO | O | / | / | OO | OOO |
| Piombo | OOO | OOO | / | OO | OOO | OOO | OOO | / | / | / | O | OOO |
| MATERIALI ORGANICI | | | | | | | | | | | | |
| Materiali polimerici | O | O | OOO | OO | / | / | OO | / | OO | OOO | OOO | OOO |

Legenda: /=azione nulla O=azione minima OO=azione di media entità OOO=azione di notevole entità

5 - DANNI ATTESI: APPLICAZIONE A DUE CASI CAMPIONE

5.1 Il caso del Rame

Il rame è un metallo di colore rosso, il cui simbolo chimico è Cu (dal nome latino cuprum, derivante da aes Cyprium "bronzo di Cipro") Molto duttile, malleabile e flessibile, è il migliore conduttore di elettricità e di calore dopo l'argento. Anche il rame, come gli altri materiali metallici, è afflitto da processi di ossido-riduzione, fenomeno che si instaura in conseguenza dell'interazione tra il materiale e l'ambiente che lo circonda e può causare alterazione e degrado delle proprietà chimico-fisiche.

I fenomeni di corrosione possono dividersi in corrosione a secco (dry corrosion) e corrosione ad umido (wet corrosion).

La corrosione a secco si riferisce alle condizioni di esposizione ad atmosfere a bassissima umidità relativa, non proprio tipiche dei luoghi in cui operiamo, in assenza di acqua condensata sulla superficie. L'ambiente non è conduttivo e i processi ionici sono limitati alla superficie del metallo e agli strati di prodotti di corrosione. A temperatura ambiente la velocità di reazione è bassa e diventa significativa solo ad alte temperature, quando i processi diffusivi sono dominanti: nel caso dei materiali metallici di interesse storico-artistico o archeologico il fenomeno non può essere molto diffuso ma lo può diventare se i manufatti sono sottoposti a trattamenti termici, quali ad esempio gli incendi degli edifici.

La corrosione a umido ha luogo quando il materiale metallico viene a contatto con agenti aggressivi in soluzione acquosa (elettrolita) e segue cammini diversi di reazione in funzione del grado di acidità o basicità della soluzione; è la tipologia di attacco che maggiormente interessa i beni culturali, sia per quanto riguarda l'esposizione all'atmosfera sia per quanto riguarda il contatto con il suolo e l'ambiente marino. Il degrado avviene attraverso due reazioni di ossido-riduzione complementari che hanno luogo contemporaneamente:

- ossidazione anodica del metallo, con liberazione di elettroni:
 - $Me \rightarrow Me^{z+} + ze^{-}$
- riduzione catodica di specie ossidanti, con consumo di elettroni. Negli ambienti naturali il principale agente catodico è l'ossigeno che, in funzione del pH, può ridursi secondo le seguenti reazioni:

in ambiente acido:



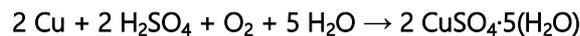
in ambiente neutro o alcalino:



Gli edifici di interesse storico artistico e non solo presentano spesso elementi in rame, specie nei sistemi di smaltimento delle acque. Proprio queste condotte e faldalerie, spessissimo in lamiera di rame, sono esposte all'atmosfera e si possono ossidare con la formazione di prodotti di corrosione più o meno compatti e protettivi. Il ruolo dell'acqua, come si diceva, risulta di fondamentale importanza nel processo degenerativo, in quanto la reazione tra metallo e ossigeno, a bassa temperatura, avviene, con meccanismo elettrochimico, solo in sua presenza.

La presenza di acqua è imputabile a tre possibili fenomeni:

- Microcondensazione capillare: si verifica in corrispondenza delle disuniformità superficiali del rame. Qui si tende a formare un menisco concavo su cui l'attrazione molecolare tra liquido e vapore è così alta da favorire la transizione vapore.
- Condensazione chimica: è dovuta alla possibilità di interazione chimica tra vapor d'acqua e i sali presenti nella superficie metallica per dare forme fortemente idratate. Nel caso di bronzi artistici esposti all'aperto, ad esempio, il rame reagisce con H_2SO_4 formando solfato di rame pentaidrato (calcantite), solubile e che viene dilavato:



Condensazione da adsorbimento, dovuta alle forze di legame chimico tra le molecole di vapore d'acqua e la superficie del metallo.

L'intervento di fenomeni di condensazione superficiale e di adsorbimento di acqua da parte degli inquinanti e delle particelle estranee fa cadere a valori molto bassi l'umidità critica, ossia quel tenore di umidità relativa oltre il quale la velocità di corrosione aumenta in maniera considerevole. Gli inquinanti gassosi come noto sono principalmente SO_2 , SO_3 , H_2S , NH_3 , NO_2 , CO , CO_2 e vari altri prodotti minori di carattere organico. Questi possono agire sia allo stato gassoso, adsorbendosi direttamente sulla superficie del metallo, sia entrando in un ciclo che comporta l'entrata e il trasporto nelle coltri nuvolose, la loro ossidazione (ad esempio per azione dell'ossigeno o dei raggi u.v.), e la loro precipitazione sotto forma di piogge acide, contenenti H_2SO_4 , HNO_3 .

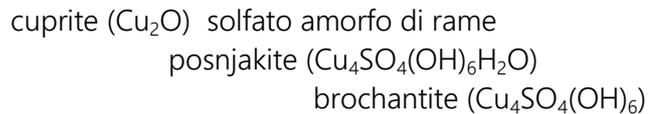
Gli inquinanti solidi sono di origine diversa e possono esercitare azione corrosiva di intensità differente: le sabbie, ad esempio, ostacolano l'asciugamento della superficie metallica, gli ossidi metallici (di ferro, di vanadio) catalizzano l'ossidazione di SO_2 a SO_3 e favoriscono la produzione di H_2SO_4 con effetti deleteri per qualunque manufatto artistico e archeologico ma anche per la semplice faldaleria dei tetti.

Patine sul rame

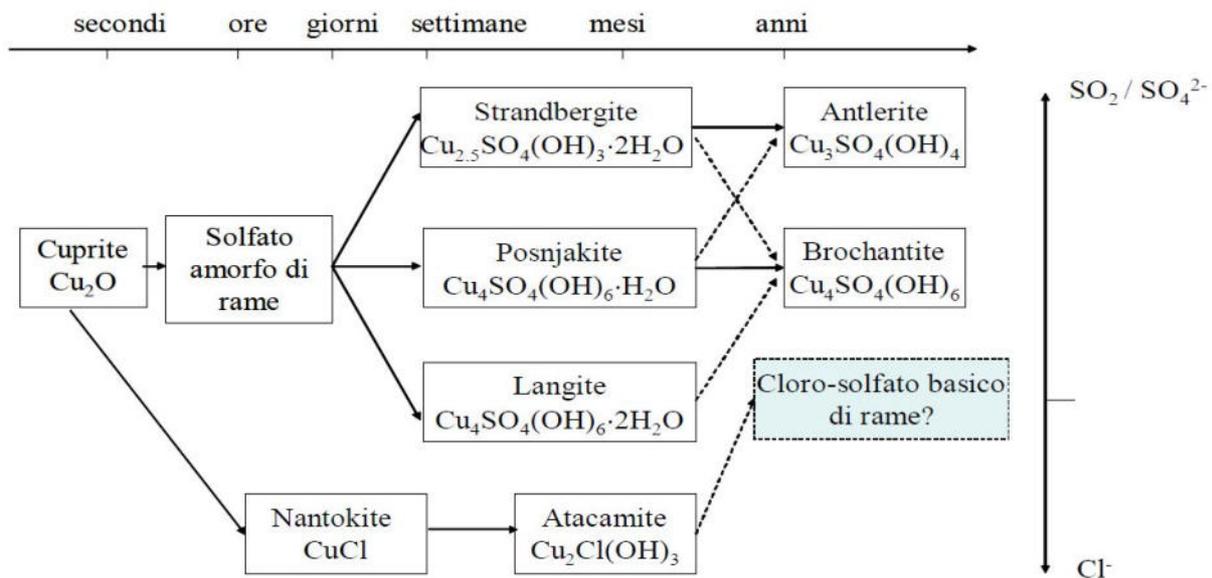
Studi condotti in ambienti rurali e urbani, raccolti in A. Krättschmer, I. Odnevall Wallinder, Cristofer Leygraf, "The evolution of outdoor copper patina", *Corrosion Science*, N° 44 (2002), hanno messo in luce che in situazioni moderatamente inquinanti (caratterizzati da solfati) la formazione della patina, durante i primi anni di esposizione, preveda almeno quattro stadi: già dopo pochi secondi inizia a formarsi un sottile film di cuprite (Cu_2O), il cui spessore aumenta progressivamente.

Compaiono, quindi, solfati amorfi di rame (dopo pochi giorni), posnjakite ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6\text{H}_2\text{O}$, dopo pochi mesi) e brochantite ($\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$, dopo alcuni anni).

La sequenza di reazioni è così schematizzabile:



ma diventa molto più complessa, coinvolgendo un maggior numero di composti del rame, all'aumentare delle concentrazioni di inquinanti presenti in atmosfera. Altre possibili reazioni sono illustrate in questo schema tratto dal testo sopraccitato:



La patina che si forma presenta un numero di composti inferiore a quello osservato nell'esposizione riparata. La ragione di questo è attribuibile al dilavamento, che impedisce alle sostanze presenti in atmosfera di fissarsi sulla superficie metallica e rimuove i composti più solubili. I prodotti di corrosione riscontrati più frequentemente sono cuprite, posnjakite e brochantite; langite, strandbergite ed antlerite sono rari e presenti solo in tracce.

Il rame esposto all'atmosfera, specialmente all'aperto come negli edifici, presenta sempre un film acquoso sopra lo strato di ossido superficiale. L'acqua è il risultato dell'adsorbimento di vapore acqueo sulla superficie, in condizioni di umidità da moderata ad elevata, ma anche di fenomeni di precipitazione attiva (pioggia, rugiada).

Nella seguente tabella, tratta da *Thomas E. Graedel, "Copper patinas formed in the atmosphere-II. A qualitative assessment of mechanisms", Corrosion Science, vol. 27 (1987)*, sono riportate, per differenti condizioni di esposizione, le caratteristiche del film che si sviluppa.

| Condizione di esposizione | Massa d'acqua depositata per unità di superficie (gm^{-2}) | Spessore dell'acqua(nm) |
|---|---|-------------------------|
| RH 60%, 20°C | 0.0055 | 5.5 |
| RH 90%, 20°C | 0.0095 | 9.5 |
| RH _{critr} presenza di particelle depositate | 0.01 | 10 |
| RH 100% | 1 | 10 ³ |
| Rugiada | 10 | 10 ⁴ |
| Pioggia | 10 ² | 10 ⁵ |

Ogni reazione successiva allo sviluppo del film acquoso avviene o all'interno dello stesso oppure all'interfaccia gas/liquido. Per studiare il comportamento del rame in soluzione acquosa, sono stati costruiti dei diagrammi di stabilità che approssimano le condizioni incontrate durante l'esposizione all'atmosfera del metallo. Lo scopo è quello di correlare più strettamente lo sviluppo della patina con le specie presenti nell'atmosfera in cui la stessa si forma.

Considerazioni e indirizzi di ricerca

Negli edifici il rame è quasi sempre esposto all'atmosfera, presenta quindi quasi costantemente un film acquoso sullo strato di ossido superficiale. Ogni reazione successiva allo sviluppo del film acquoso avviene o all'interno dello stesso oppure all'interfaccia gas/liquido. Lo studio approfondito sul ruolo delle specie presenti in atmosfera sul meccanismo di formazione della patina è il percorso per le future ricerche.

Certo le piogge acide sono una delle principali cause di degrado dei rami esposti all'aperto. Per correlare più strettamente lo sviluppo della patina con i solfati presenti nell'atmosfera in cui la stessa si forma sono stati costruiti diagrammi di stabilità del rame in soluzione acquosa. Questi evidenziano come le specie stabili in regime di pioggia siano l'antlerite ($\text{Cu}_3(\text{SO}_4)(\text{OH})_4$) e la brochantite, ($\text{Cu}_4(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$). Le velocità di formazione della patina, misurate durante l'esposizione del rame all'atmosfera e in ambienti differenti, sono maggiori durante i primi anni di esposizione e

diminuiscono progressivamente, fino a divenire trascurabili, dopo una decina di anni. Queste sono indipendenti dai meccanismi di ossidazione superficiale e dall'acidità delle precipitazioni. La velocità di crescita della patina in funzione del tempo ha andamento parabolico: aumentando di spessore, infatti, il film di prodotti di corrosione ostacola sempre più la diffusione degli ioni rame verso la superficie esterna e rallenta la formazione di nuovi depositi.

L'esperienza sul campo ha però messo in evidenza come si stia affacciando un nuovo importante fenomeno di degrado di natura meccanica sulle superfici esposte: la grandine, i cui urti sono in grado di deformare e scalfire i materiali.

5.2 Il caso del Marmo

Si intendono per marmi quelle rocce metamorfiche costituite prevalentemente da carbonato di calcio (calcite) e carbonato di calcio e magnesio (dolomite). La struttura è saccaroide, granulare, a tessitura isotropa, e la loro formazione avviene per metamorfismo di rocce sedimentarie, quali il calcare e la dolomia e, se presenti, delle impurità in esse contenute che caratterizzeranno la cromia finale del marmo. Se le rocce sedimentarie di partenza non presentano impurità, allora il marmo risulterà bianco.

Caratteristiche principali del marmo sono il peso elevato e una porosità ridotta, che da compattezza alla roccia ma, per contro, presenta l'aspetto negativo legato al fatto che la piccola dimensione dei pori della roccia permette un'elevata risalita capillare.

Bisogna inoltre ricordare che esiste una larga varietà di marmi, con diverse tessiture: in base alle differenze tra le geometrie di cristallizzazione, cambia anche il comportamento della pietra rispetto ai fattori di degrado e, in particolare, cambia la morfologia del degrado. In altre parole, a seconda della roccia soggetta al degrado, si potranno verificare fenomeni di decoesione, polverizzazione, scagliatura, distacco o alveolizzazione.

Naturalmente, questi fenomeni dipendono anche dalla natura dei fattori di degrado: percolamento, infiltrazione, deposizione, irraggiamento, gelo-disgelo, attacco biologico.

Deposizione acida e carsismo

La deposizione acida (o *pioggia acida*), è uno dei principali fattori di degrado dei marmi e delle rocce carbonatiche, di natura antropogenica e causa l'alterazione cromatica, la solfatazione e conseguente decoesione del marmo. Consiste nella formazione di acido solforico e di acido nitrico che, a contatto con la matrice carbonatica neutralizzano la loro acidità come di seguito, senza alcun cambiamento nella concentrazione di SO_4^{2-} .

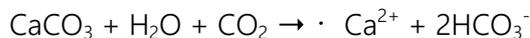


Questa reazione avviene nel tempo che intercorre tra due precipitazioni, previa deposizione degli agenti inquinanti sulla superficie sotto forma di polveri, ed è certamente accelerata dai fenomeni di condensa o da un'alta umidità relativa; con conseguente formazione di gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) che ha un coefficiente di solubilità in acqua nettamente superiore alla calcite (2 g/l contro 43 mg/l). La dissoluzione avviene quindi per dilavamento:



Non è invece ancora accertata la formazione di nitrati di calcio per esposizione della calcite a NO_x o HNO_3 .

Anche in assenza di inquinanti antropogenici, la calcite tende a solubilizzarsi per effetto delle piogge (carsismo); la sua solubilità in acqua pura è di 11 mg/l a 25 °C e cresce con l'aumentare della concentrazione di diossido di carbonio (ad una pressione di CO_2 pari 101,5 Pa, raggiunge i 43 mg/l), secondo la reazione:



La concentrazione degli ioni HCO_3^- è determinata dalla relazione:

$$\{\text{HCO}_3^-\} = (10^{-7,82} P_{\text{CO}_2}) / \{\text{H}^+\}$$

Inserendo il valore della P_{CO_2} atmosferica nell'equazione, risulta:

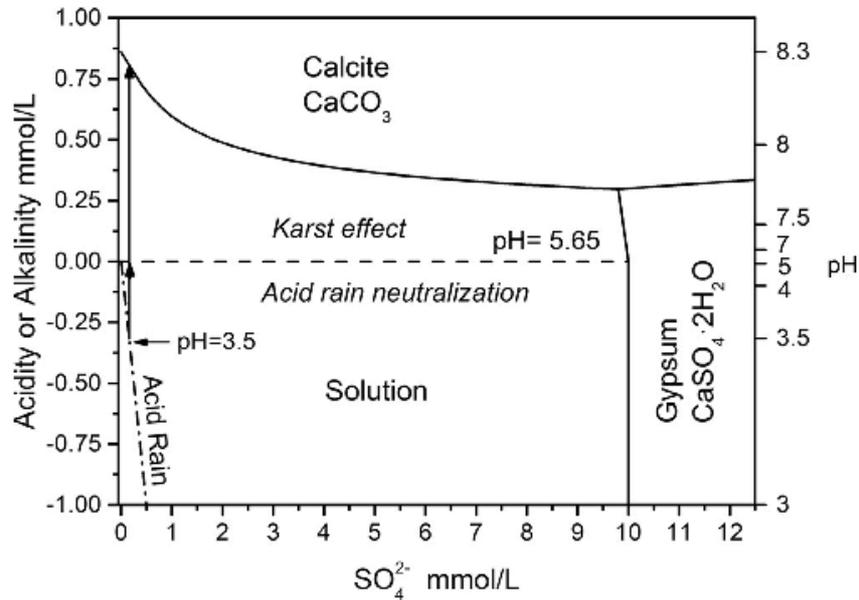
$$\text{HCO}_3^- = 10^{-11,32} / \text{H}^+$$

Questo comporta che, in caso di acqua pura, che non contiene altri ioni oltre al carbonato, il pH è fissato a 5,65. Pertanto solo le piogge con pH inferiore a questo possono essere definite come prodotto dell'inquinamento antropogenico. (Livingstone, 2016)

Nel testo *Acid rain attack on outdoor sculpture in perspective*, Livingstone propone inoltre un modello a tre componenti, per l'analisi del comportamento dei carbonati in relazione alla concentrazione dei tre ioni: SO_4^{2-} , H^+ e HCO_3^- :

$$\Delta\text{Ca}_2^+ = 0,5 \Delta\text{HCO}_3^- - 0,5 \Delta\text{H}^+ - \Delta\text{SO}_4^{2-}$$

Tuttavia questo modello è stato criticato (Cardell-Fernandez et al., 2002) in quanto inapplicabile per modelli predittivi, ma atto solo allo studio dei fenomeni erosivi. Si riporta, di seguito, il diagramma di fase.



Nello stesso articolo, Livingstone elabora anche un modello a cinque componenti, inclusivo degli ioni cloro, azoto e acidi organici:

$$\Delta\text{Ca}_2^+ = \Delta\text{SO}_4^{2-} + 0.5 \Delta\text{NO}_3^- + 0.5 \Delta(\text{Cl}^- - \text{Na}^+) + 0.5 \Delta\text{Alk} + \Delta\text{Organics}$$

dove $\text{Alk} = \text{HCO}_3^- - \text{H}^+$.

Concludendo, dallo studio emerge quanto le deposizioni secche (PM_{10}) siano effettivamente più incisive sulla perdita di materiale rispetto alle deposizioni umide (*piogge acide*), sia per quel che riguarda i marmi che per i bronzi. Nel caso del marmo, si stima che per una perdita di ioni Ca_2^+ pari a 0,158 mmol/l per deposizione umida, corrisponda una perdita di 10,5 mmol/l per deposizione secca, ovvero oltre sessanta volte tanto.

Considerazioni e indirizzi di ricerca

Tra le funzioni di arretramento superficiale prese in esame, solo Christodoulakis et al. (2016) e Kucera et al. (2007) prendono in considerazione il particolato atmosferico, secondo le seguenti formule:

Christodoulakis et al. (2016):

$$R = 4 + 0.002[\text{SO}_2]\text{Rh}_{60} + 0.054\text{Rain}[\text{H}^+] + 0.05[\text{HNO}_3]\text{Rh}_{60} + 0.106\text{PM}_{10}$$

Kucera et al. (2007)

$$R = 4 + 0.0059[\text{SO}_2]\text{Rh}_{60} + 0.054\text{Rain}[\text{H}^+] + 0.07 [\text{HNO}_3]\text{Rh}_{60} + 0.0258[\text{PM}_{10}]$$

È evidente, nella formula di Christodoulakis, l'aumento dell'incidenza del valore di PM_{10} rispetto a Kucera, in accordo con i risultati dello studio di Livingstone (2016).

Difatti, mentre è stata accertata una drastica diminuzione della corrosione di diversi materiali dal 1980 al 2000, grazie ad una politica di abbattimento dell'inquinamento da SO_2 , si è riscontrata una lieve riaccelerazione del degrado tra il 2000 e il 2010 a causa dell'aumento dei valori di PM_{10} (Di Turo et al., 2016).

Ci si deve però interrogare sulla resistenza all'erosione di un marmo restaurato, in quanto non esistono raccolte di dati su marmi consolidati (per esempio col più comunemente impiegato Silicato d'etile) o protetti (con cere o fluorurati). Pertanto, risulta difficile stimare la ricorrenza dei futuri interventi conservativi.

Quanto invece è appurato, sono le buone pratiche per la conservazione:

1. L'allontanamento della circolazione veicolare urbana, con formazione di isole pedonali
2. L'impedimento di accesso del pubblico nelle dirette vicinanze delle superfici (per effetto di risollevarimento delle polveri sottili: Bonazza, 2009)
3. La manutenzione ordinaria delle superfici, con asportazione dei depositi
4. Interventi protettivi, di isolamento delle superfici o patinature autopulenti (es. diossido di titanio)
5. Allontanamento delle acque meteoriche

Per il controllo del degrado, sono invece da tenere in considerazione altri fattori climatici, oltre a quelli riportati nelle funzioni dose-risposta:

1. I fenomeni di precipitazione violenta
2. I bruschi cambiamenti di UR (specie in seguito ai fenomeni di cui al punto 1)
3. I cicli di gelo e disgelo, misurando la temperatura di superficie e la velocità di abbassamento delle temperature
4. Le correnti eoliche, specie se in concomitanza o appena successivi agli eventi di cui ai punti 1, 2 e 3
5. L'esposizione all'irraggiamento solare (come al punto 4).

6 – OPERAZIONI DI CONSERVAZIONE, RECUPERO E PROTEZIONE DELLE SUPERFICI ESTERNE DI OPERE CULTURALI, EDIFICI E OPERE INFRASTRUTTURALI E RELATIVI COSTI MEDI

6.1 Problematiche di conservazione, recupero e protezione

Quanto dureranno i nostri edifici?

In Giappone intervenire sulle preesistenze architettoniche è pratica che risale al IX secolo. In antichi documenti la tecnica della riparazione degli edifici, ossia *loshuri*, è un'attività che trova testimonianza per il fatto che le costruzioni erano tutte realizzate con materiali quali legno, terra e paglia che richiedevano continui interventi di manutenzione. Sull'argomento esiste un approfondito saggio di Olimpia Niglio, *The Restoration of the Temples in Japan. Between Tangibility and Intangibility*, inserito in una recente pubblicazione dal titolo Strategie e Programmazione della Conservazione e Trasmissibilità del Patrimonio Culturale

In ambito giapponese sono quindi numerosi gli esempi di ricostruzione parziale o completa dei monumenti patrimonio della nazione, cosa che in Europa risulterebbe del tutto impossibile, malgrado la maggior parte delle operazioni vengano eseguite su accertata e documentata base scientifica. Gli osservatori valutano le metodologie molto lontane da quelle varate in ambito internazionale ma il tema è molto complesso e richiede conoscenza della filosofia e della storia del patrimonio culturale giapponese. Nel restauro, ad esempio, si predilige l'uso tradizionale del legno e non quello di tecnologie innovative usate solo in casi molto particolari e solo dopo aver valutato l'impossibilità di poter procedere secondo quelle più legate alla storia. Nei cantieri di restauro, cosa che spesso non avviene neanche in Italia, non si sono perse le antiche tradizioni costruttive che per secoli hanno caratterizzato l'attività di edificare.

Dalle nostre parti il principio della sostituzione anche di sole parti degli edifici ammalorati è tema difficile da affrontare. Se si affronta l'argomento da un punto di vista normativo, la definizione di restauro in ambito edilizio urbanistico è diversa da quella prevista dall'art. 29 del Codice dei Beni Culturali, il quale stabilisce:

4. Per restauro si intende l'intervento diretto sul bene attraverso un complesso di operazioni finalizzate all'integrità materiale ed al recupero del bene medesimo, alla protezione ed alla trasmissione dei suoi valori culturali. Nel caso di beni immobili situati nelle zone dichiarate a rischio sismico in base alla normativa vigente, il restauro comprende l'intervento di miglioramento strutturale.

Lascia quindi un solo spazio alle zone a rischio terremoto, dove il rinnovamento per ragioni accertate di sicurezza pare trovare uno spiraglio applicativo.

In ambito urbanistico possiamo invece riallacciare alle definizioni originarie proprie della L. 457/78, che attraverso l'art. 31 individuava un breve elenco di interventi edilizi sul patrimonio edilizio esistente:

lettera C: interventi di restauro e di risanamento conservativo, quelli rivolti a conservare l'organismo edilizio e ad assicurarne la funzionalità mediante un insieme sistematico di opere che, nel rispetto degli elementi tipologici, formali e strutturali dell'organismo stesso, ne consentano destinazioni

d'uso con essi compatibili. Tali interventi comprendono il consolidamento, il ripristino e il rinnovo degli elementi costitutivi dell'edificio, l'inserimento degli elementi accessori e degli impianti richiesti dalle esigenze dell'uso, l'eliminazione degli elementi estranei all'organismo edilizio;

lettera D: interventi di ristrutturazione edilizia, quelli rivolti a trasformare gli organismi edilizi mediante un insieme sistematico di opere che possono portare ad un organismo edilizio in tutto o in parte diverso dal precedente. Tali interventi comprendono il ripristino o la sostituzione di alcuni elementi costitutivi dell'edificio, la eliminazione, la modifica e l'inserimento di nuovi elementi ed impianti;

Piani Regolatori e legislazioni regionali, anche Regolamenti edilizi si sono mossi in questo ambito di definizione. Tutto lascia pensare a una vita illimitata dalle nostre città all'edificio più sperduto nel territorio. Ma quanto dureranno effettivamente? Possiamo pensare che gli interventi manutentivi possano garantire per sempre la vita dell'intero patrimonio costruito?

Cosa conservare, cosa sostituire

Il Council on tall building and urban habitat (Ctuh), organo internazionale nel campo degli edifici alti e della progettazione urbana sostenibile, ha evidenziato nel suo ultimo rapporto che l'età media di questi edifici è di 42 anni. Dopo quella soglia, mediamente, scatta un problema di obsolescenza fisica o funzionale. Sostituire, e quindi demolire, dopo il ciclo di vita, è oggi una realtà. Molti i casi concreti, dagli Stati Uniti alla Cina, dove in alcuni contesti è risultato impossibile il recupero economico del bene e si è optato per la sostituzione edilizia. Questo apre il tema dello smaltimento del materiale, tradizionalmente acciaio o calcestruzzo.

Il patrimonio edilizio italiano, frutto di una straordinaria stratificazione di civiltà, ricchezza, diversità, è costituito da edifici vecchi. Il capitale edilizio e quello infrastrutturale del Paese sono entrati in un ciclo di obsolescenza crescente. Dei 12,2 milioni di edifici residenziali censiti dall'Istat, per esempio, 7,2 milioni (il 60%) sono stati costruiti prima del 1980; 5,2 milioni (42,5%) hanno più di 50 anni (dati ISTAT). Più della metà delle abitazioni - oltre 16 milioni - sono state realizzate prima del 1970. Il 15% degli edifici è stato realizzato prima del 1918 e circa il 65% è stato costruito precedentemente alla prima legge che introduceva criteri per il risparmio energetico (1976). Altro dato di notevole interesse.

La paura di commettere gli errori del passato, quando con il boom edilizio furono demoliti senza scrupolo migliaia di edifici storici, ha nutrito negli ultimi anni la corrente della tutela a tutti i costi. Di fronte all'impossibilità da parte delle Soprintendenze di vincolare tutti i manufatti di interesse anche solo documentario e alla necessità da parte di queste di distinguere ciò che è più meritevole di tutela con lo strumento del decreto di vincolo diretto, si sono diffuse altre tipologie di vincolo. Ad esempio, la ricognizione delle aree di notevole interesse pubblico, da realizzarsi ai sensi della parte II del Codice dei Beni Culturali, quella dedicata al paesaggio, che per effetto dell'art. 136 consente di dichiarare sottoposti a tutela *i complessi di cose immobili che compongono un caratteristico aspetto avente valore estetico e tradizionale, inclusi i centri ed i nuclei storici.*

Il dibattito è aperto e contrastato. Un dato è certo: solo la rianimazione degli edifici antichi permette la loro difesa e salvaguardia, insieme ai complessi storici cui fanno parte. L'uso di edifici insalubri, o inadatti alla vita del giorno d'oggi, non solo in funzione della residenza, dipende esclusivamente dalla soluzione che si adotta. In ogni caso soltanto l'uso di un edificio garantisce la sua manutenzione e quindi la sua vita e la trasmissibilità alle generazioni future.

Nuovi climi, vecchi materiali

Anche nel nostro paese, sul fronte delle precipitazioni le cose sono molto cambiate negli ultimi 10 anni. Non tanto per la quantità di acqua caduta dal cielo, che in media su base annua rimane la stessa, quanto invece per la frequenza e l'intensità. Se nel 2010 sono stati registrati 194 episodi di piogge intense, nel 2018 si è arrivati a quota 295. In pratica, quasi il doppio (dati Eswd). Ancora più evidente è lo scarto di eventi estremi come tornado e forti raffiche di vento: nel 2010 ne sono state censite 123, mentre nel 2018 ben 494. Un esempio eclatante è quanto avvenuto recentemente con la cosiddetta Tempesta Vaia, che ha investito il nord-est italiano a seguito di una fortissima perturbazione di origine atlantica.

Tra il 26-30 ottobre 2018 un fortissimo vento caldo di scirocco, soffiando tra i 100 e i 200 km/h per diverse ore, ha provocato la morte di milioni di alberi con la conseguente distruzione di decine di migliaia di ettari di foreste alpine. Caddero al suolo in soli tre giorni (27, 28 e 29 ottobre) fino a 715 mm di pioggia, quelli registrati nella stazione di rilevamento di Soffranco (Longarone), superando i dati del 1966 e ben 870 mm a Forni di Sotto sulle Prealpi carniche in Friuli. Per diverse stazioni del bellunese, i quantitativi di pioggia caduti durante l'evento hanno costituito un record assoluto da quando l'Agenzia regionale per la protezione ambientale ha incominciato il monitoraggio pluviometrico sul territorio (ossia dal 1992).

Ai nuovi climi non sempre si risponde con nuovi materiali. Le tipologie costruttive della tradizione, spesso necessariamente riproposte nel corso dei restauri di edifici tutelati, non sono più in grado di affrontare l'azione combinata acqua-vento-grandine. L'aggressione dei materiali è soprattutto quella che possiamo denominare dell'umidità meteorica: si forma sulle superfici esterne delle murature ed è direttamente conseguente al fenomeno delle precipitazioni atmosferiche. Acqua e vento, abbinati, tendono a bagnare di più le superfici dei prospetti. Assistiamo nelle murature a una penetrazione diretta o indiretta agevolata da diversi fattori: l'intonaco difettoso con composizione tale da renderlo completamente impermeabile senza permettere l'evaporazione dell'acqua, l'intonaco fessurato, la malta deteriorata, l'utilizzo di materiali con caratteristiche tra loro diverse che ne provocano il distacco, difetti di connessione fra infissi e muratura; tutti questi sono fattori che favoriscono la penetrazione diretta. Anche lo stesso rimbalzo della pioggia dal pavimento alle pareti, fa parte della categoria di penetrazione indiretta nelle murature. All'umidità di infiltrazione si aggiunge quella causata da guasti alle coperture o per inadeguato funzionamento dei sistemi di smaltimento delle acque meteoriche, a volte danneggiati dal vento o dalla grandine. La pioggia penetra facilmente nei materiali porosi infradiciando porzioni anche consistenti di muratura. Attraverso i tetti, spesso deformati per dissesto o degradazione delle strutture portanti (in legno) oppure per faticanza dei manti di copertura (tegole rotte, mancanti o sconnesse per azioni, ancora una volta, del vento, della grandine o di volatili), le infiltrazioni di acqua provocano infradiciamento di intere sezioni murarie. Altri punti critici di possibile infiltrazione sono fessurazione e dissesti murari, cornicioni, marcapiani, soglie e contorni di serramenti, aggetti, giunti murari e strati di allettamento. L'acqua meteorica, inoltre, può penetrare orizzontalmente

nel muro grazie al vento e alla capillarità del materiale. La sua pressione, in direzione normale ad una superficie, varia da pochi kg/m^2 , fino a 150 kg/m^2 nel caso di quegli eventi atmosferici eccezionali, purtroppo sempre più frequenti.

6.2 Intervenire sul degrado: due casi di studio torinesi

Il primo caso studio torinese analizzato è Palazzo Mazzonis, attuale sede del Museo di Arte Orientale. Dopo diversi sopralluoghi e analisi è emersa la necessità di eseguire un rifacimento del manto di copertura e interventi sulle facciate.

(Il caso di Palazzo Mazzonis viene illustrato al punto 9.1 dell'appendice)

Dall'analisi di Palazzo Mazzonis a Torino, IPOTESI DI COSTI MEDI

Per l'edificio torinese è stato analizzato un primo quadro di riferimento dei costi. Sarebbe eccessivo attribuire ai nuovi climi l'insieme delle spese che si dovranno affrontare ma risulterebbe altrettanto sbagliato sottostimare il loro contributo nell'accelerazione dei processi degenerativi.

Nell'analisi si considera, per la natura tutelata dello stabile, la possibilità di applicare l'IVA al 10%,

| TETTI (IVA 10%) | € | 580.000 |
|-----------------|---|---------|
|-----------------|---|---------|

| | | |
|---|---|---------|
| Manto di copertura in coppi m ² 1.450 | € | 480.000 |
|---|---|---------|

- Rimozione manto
- Rimozione piccola orditura
- Rimozione faldaleria
- Revisione delle orditure e ignifugazione
- Nuovo sistema di sottostruttura ventilato e coibentato
- Nuova faldaleria in lamiera di rame comprensiva di paraneve
- Manto in coppi alla piemontese ancorati
- Abbaini

| | | |
|--------------------------------|---|---------|
| Terrazzo m ² 200 | € | 100.000 |
|--------------------------------|---|---------|

- Smontaggio della pavimentazione
- Demolizione guaine e sottofondi
- Isolamento termico
- Impermeabilizzazione
- Pavimentazione galleggiante
- Revisione lucernari

Questo dato ci permette di individuare nel degrado dei manti di copertura un costo medio di € 351 al m² per il rifacimento esclusa la piccola orditura.

Valutando prudentemente l'incidenza dell'accelerazione climatica maggiorativa di solo 1/3 rispetto a situazioni di precipitazioni più stabili e considerando la necessità di un rifacimento del manto a distanza di 20 anni e manutenzioni annuali pari al 1% del valore:

COSTI CLIMATICI LEGATI ALLA SOSTITUZIONE DEL MANTO

| | | | |
|---|-----------------|------------------|--|
| 1/3 di € 351/m ² su 20 anni | incidenza annua | €/m ² | 5,85 |
| Manutenzioni 1/3 x 1% x di € 351/m ² | incidenza annua | €/m ² | 1,17 |
| FACCIAE SULLE VIE (IVA 10%) | € | | 660.000 |
| Via San Domenico e via Sant'Agostino m ² 1.300 | € | | 310.000 |
| | | | <ul style="list-style-type: none"> • Rimozione completa degli intonaci • Applicazione di coibentazione • Rifinitura davanzali e Abbaini • Intonaci e finitura • Opere da decoratore |
| Cortile m ² 1.450 | € | | 350.000 |
| | | | <ul style="list-style-type: none"> • Rimozione completa degli intonaci • Applicazione di coibentazione • Rifinitura davanzali e Abbaini • Intonaci e finitura • Opere da decoratore |

Anche questo dato ci permette di individuare un costo medio, in questo caso di € 240 al m² per il rifacimento delle superfici intonacate. L'incidenza dell'accelerazione climatica, che si rapporta in questo caso alla scarsa qualità dei prodotti usati, è maggiorativa di 1/4 rispetto a situazioni di precipitazioni più stabili, considerando la necessità di una revisione totale a distanza di 30 anni e manutenzioni annuali pari al 2% del valore:

COSTI CLIMATICI LEGATI AL RIFACIMENTO DEGLI INTONACI

| | | | |
|---|-----------------|------------------|------|
| 1/4 di € 240/m ² su 30 anni | incidenza annua | €/m ² | 2,00 |
| Manutenzioni 1/4 x 2% x di € 240/m ² | incidenza annua | €/m ² | 1,20 |

TABELLE RIASSUNTIVE CON COSTI UNITARI

LAVORAZIONE TETTI

| | | |
|--|------------------|-----------|
| Lavorazioni manto di copertura, esclusa piccola orditura | €/m ² | 351 circa |
|--|------------------|-----------|

I costi climatici legati alla sostituzione del manto sono così riassumibili:

| | | | |
|---|-----------------|------------------|------|
| 1/3 di € 351/m ² su 20 anni | incidenza annua | €/m ² | 5,85 |
| Manutenzioni 1/3 x 1% x di € 351/m ² | incidenza annua | €/m ² | 1,17 |

LAVORAZIONE FACCIATE

| | | |
|---|------------------|-----------|
| Lavorazioni facciate su via San Domenico, via Sant'Agostino e cortile | €/m ² | 240 circa |
|---|------------------|-----------|

I costi climatici legati al rifacimento dell'intonaco sono così riassumibili:

| | | | |
|---|-----------------|------------------|------|
| 1/4 di € 240/m ² su 30 anni | incidenza annua | €/m ² | 2,00 |
| Manutenzioni 1/4 x 2% x di € 240/m ² | incidenza annua | €/m ² | 1,20 |

CONSIDERAZIONE SULLA FORMULAZIONE DEI COSTI MEDI

Il caso studio di Palazzo Mazzonis a Torino, con dati resi disponibili da un'attività di progettazione in corso da parte dello studio di Architettura "Officina delle Idee", rappresenta un primo tentativo di associare i danni provocati da un'aggressione climatica non prevedibile in anni passati. Molto difficile associare percentuali di incidenza sui costi complessivi ma l'esperienza manutentiva su edifici di questo tipo ci permette di avanzare delle ipotesi su scenari futuri dove l'importanza dei monitoraggi, dei controlli e degli ordinari interventi necessari a tenere in efficienza gli edifici rappresenteranno la sola strada percorribile per trasmettere alle generazioni future l'eredità del patrimonio storico del nostro Paese.

Il secondo caso studio interessa Palazzo Madama, la cui facciata è stata in questi ultimi anni oggetto di numerosi studi e, tra poco, di un restauro conservativo.

(Il caso di Palazzo Madama viene illustrato al punto 9.2 dell'appendice)

Dall'analisi di Palazzo Madama a Torino, IPOTESI COSTI DI RECUPERO

L'edificio sarà a breve interessato da un primo imponente cantiere strutturale finalizzato alla messa in sicurezza delle tre architravi e a seguire, negli anni futuri, da un intervento di restauro dell'enorme superficie esposta. Stiamo parlando di circa 4.000.000 di €. Gli interventi ispettivi e in parte manutentivi annuali sulla facciata hanno avuto un'incidenza variabile tra 8 e 10.000 €, senza praticamente mai agire sulla struttura del degrado ma lavorando unicamente sul contenimento dei rischi.

Il caso di Palazzo Madama ci fornisce questi dati:

- Ultimo importante restauro della facciata 1972
- Intervento 2010: € 220.000 per regimentazione acque e messa in sicurezza
- Intervento 2014: € 110.000 per messa in sicurezza
- Costi medi annui per revisioni: € 9.000
- A distanza di 50 anni l'incidenza della spesa è prossima a € 1.000 per ogni metro quadro di superficie a cui si aggiungono i circa 115 € per ogni metro quadro necessari per le revisioni.
- Il dato ha un'impennata negli ultimi anni per vari fattori, difficili da correlare, tra questi sicuramente una maggiore attenzione al rischio delle cadute di materiali dagli edifici e alla complessiva presa di coscienza nei confronti del tema della sicurezza nei luoghi pubblici.
- Dividendo € 1.115 su 50 anni abbiamo 22,30 € al metro quadro di costi indotti dal degrado del materiale le cui cause vanno ricercate, e questa è la tesi di questo lavoro, in molti fattori non sempre riconducibili a semplici formule causa-effetto.

TABELLA RIASSUNTIVA CON COSTI UNITARI

RESTAURO FACCIATA JUVARRIANA

| | | |
|---|------------------|-------------|
| Costo medio tenendo conto di fattori difficili da prevedere | €/m ² | 22,30 circa |
|---|------------------|-------------|

7 – CONCLUSIONI E IPOTESI PER LO SVILUPPO DI ULTERIORI RICERCHE

L'approccio immaginato al lavoro proposto, basato sulle formule dose-risposta, ha evidenziato dei grossi limiti nella sua applicazione pratica a casi reali costituiti da edifici e opere edilizie complesse, a maggior ragione se costituite da stratificazioni storiche come lo sono la maggior parte di quelle che costituiscono il patrimonio della nostra nazione. Esso in effetti potrebbe forse essere utilizzato in casi molto semplici dove l'oggetto analizzato è costituito da materiali compatti e omogenei, per i quali il danno prevalente provocato dai processi legati ad inquinanti e agli attacchi legati al clima è effettivamente dovuto alla lenta perdita di materiale in superficie. In quei casi si possono analizzare le aggressioni chimiche (dissoluzione, solfatazione, argillificazione-sericitizzazione, carbonatazione, ecc.), alimentate dai fenomeni di inquinamento. Si tratterebbe principalmente di materiali quali il marmo, il calcare compatto, il bronzo, i granitoidi, più difficilmente i calcestruzzi, che hanno un impiego molto spesso localizzato a parti di edifici o a opere monumentali (statue), quindi a situazioni abbastanza particolari all'interno del patrimonio edilizio.

In questi casi la sequenza logica (ideale e teorica) dei passaggi da seguire per arrivare all'obbiettivo proposto potrebbe essere questa:

- 1) **Individuazione del materiale**, verificando quindi che abbia senso sullo stesso, in base a quanto premesso, sviluppare questo tipo di procedura;
- 2) **Scelta della formula dose-risposta** più adatta al caso in questione, in relazione principalmente ai dati a disposizione, eventualmente facendo riferimento a più formulazioni da mettere a confronto;
- 3) **Introduzione dei dati su inquinanti e clima** nella formula prescelta;
- 4) **Valutazione del tasso di perdita di materiale** dalla superficie del manufatto (mm/anno);
- 5) **Definizione di una soglia di perdita di materiale** oltre la quale risulta necessario un intervento di manutenzione, legato al tipo di manufatto, più o meno sensibile al fenomeno;
- 6) **Definizione del numero di interventi** nel tempo (p.e. con proiezione al 2030);
- 7) **Definizione di un costo parametrico**, sulla base del tipo di intervento e dei tariffari a disposizione;
- 8) **Calcolo dell'impatto economico**: n°. interventi x costo parametrico.

In questo modo si arriverebbe a valutare l'impatto economico nelle attuali condizioni ambientali. Per valutare l'effetto di aggravamenti o miglioramenti dell'attuale quadro, in base alla proiezione dei dati alla data di riferimento (p.e. 2030), si andrebbero a sostituire gli stessi nella formula, ottenendo quindi il valore dell'impatto economico in prospettiva futura.

Un altro importante limite/complicazione a questo modo di operare, oltre alla difficile applicazione al caso di strutture complesse, è il fatto che eventuali interventi di protezione/consolidamento pregressi o il primo intervento previsto nel periodo di riferimento comporterebbe un successivo diverso comportamento del manufatto, che dovrebbe risultare molto meno sensibile agli effetti degli agenti di alterazione, per cui sarebbero necessarie nuove formulazioni dose/risposta che tenessero conto anche di questo aspetto, delle quali non è stato trovato alcun riferimento in letteratura.

Per cercare di superare questi limiti, **sono state proposte differenti metodiche di studio**: Appolonia et al. 2009 (vedi sintesi nella rassegna bibliografica) si sono concentrati sulla problematica del processo di solfatazione (formazione di croste nere su rocce calcaree) e hanno evidenziato che è possibile affrontare più efficacemente il problema sviluppando **nuovi modelli numerici basati sull'analisi numerica e il confronto dei dati ottenuti sperimentalmente**, al fine di descrivere lo sviluppo del processo di degrado nel tempo.

Da notare che proprio al Laboratorio della Soprintendenza dei Beni Culturali e Ambientali della Regione Valle d'Aosta, in collaborazione con numerosi enti di ricerca nazionali, si devono numerosi studi sperimentali sul degrado dei materiali legato alle condizioni meteorologiche e di inquinamento, che hanno avuto come oggetto importanti monumenti quali il Teatro Romano e l'Arco di Augusto ad Aosta.

In considerazione delle problematiche descritte, è stato proposto un altro possibile approccio al tema di studio, che tiene conto della difficoltà di applicare le funzioni dose/risposta alla maggior parte dei casi reali, sia che si tratti di singoli materiali che rispondono in maniera complessa agli attacchi fisico-chimici e climatici, che si rivelano essere i più comunemente utilizzati, sia che si tratti di applicare la metodologia a edifici, normalmente caratterizzati da fenomeni di degrado diversi e complessi sulle varie parti da cui essi sono costituiti. Quest'ultimo caso potrebbe essere quello più interessante in quanto applicabile ad una più ampia generalità di casi.

Nella relazione viene quindi sviluppato un ragionamento incentrato su due casi reali emblematici e ben conosciuti da componenti del gruppo di lavoro (Officina delle Idee e la Dr.ssa Carlone) che prevede schematicamente la seguente sequenza:

- 1) **Individuazione dei processi di degrado** che interessano l'edificio;
- 2) **inquadramento gli interventi necessari** al suo recupero e alla sua protezione;
- 3) **stima parametrica dei costi medi** richiesti dagli interventi;
- 4) **stima dell'incidenza annua di tali costi** sulla base dell'esperienza nel tempo delle attività di manutenzione e recupero.

I casi studio proposti, con dati resi disponibili da un'attività di progettazione, rappresentano un primo tentativo di associare i danni provocati da un'aggressione climatica non prevedibile in anni passati. Resta molto difficile associare percentuali di incidenza sui costi complessivi, ma l'esperienza manutentiva su edifici di questo tipo può permettere di consolidare delle metodiche adatte a fornire delle previsioni sugli investimenti per il loro mantenimento da modularsi nel tempo in relazione ai fenomeni di degrado conseguenti agli agenti inquinanti e alle condizioni meteorologiche cui sono sottoposti.

Il tempo però agisce in modo ambivalente sul patrimonio che il passato ci consegna: da un lato logora i manufatti, dall'altro ne accresce il valore, ne esalta l'unicità trasformando il presente in testimonianza preziosa di arte e di cultura. Abbiamo visto, soprattutto nei casi studio, come questa azione costituisce un lavoro sia positivo che distruttivo, dove l'apparente solidità dei materiali che compongono le costruzioni dell'uomo viene messa a nudo dalla caducità degli stessi e delle tecniche con cui sono stati assemblati. Ma il deterioramento non è chiaramente percepibile, salvo in rari casi, se non in un arco temporale esteso, spesso fuori dalla nostra portata. Abbiamo toccato con mano come il tasso di invecchiamento sia molto difficile da quantificare, i risultati ottenuti da questo lavoro sono ardui da misurare, così come l'aspetto degli oggetti che osserviamo che fino al restauro non migliora e a volte nemmeno peggiora, vanificando i nostri sforzi nel capire.

Questa incapacità nel valutare correttamente l'azione del tempo e del clima, quest'ultimo in chiaro repentino cambiamento, sui manufatti e sui materiali che li compongono comporta che i responsabili dell'allocazione delle risorse siano più invogliati a soluzioni drastiche. Finanziare un intervento di restauro, di cui si possono ammirare gli esiti a breve termine, spendere bene in comunicazione sull'investimento intrapreso, trarne un effetto positivo di visibilità, viene preferito all'investimento nell'acquisto e gestione di processi conoscitivi e di sistemi di monitoraggio delle situazioni. Occorre entrare nell'ordine delle idee che la prevenzione è conveniente, anche nel settore dei beni culturali proprio ora che si scoprono patrimoni sempre più vulnerabili e che le azioni del clima paiono sempre più incisive. Prevenire significa vigilare quotidianamente affinché la vita degli oggetti che formano la nostra tradizione stratificata e visibile, possa continuare a scorrere nell'efficienza e nella sicurezza dei fruitori. Le tecnologie di cui disponiamo possono dare ora un aiuto decisivo, ma come sempre è compito di chi opera lavorare con adeguata e tempestiva consapevolezza, competenza, sensibilità.

L'effetto rinnovativo del restauro che dona una sbalorditiva e apparente giovinezza, quella che in breve tempo torna a sparire, è l'ultima riflessione con cui vogliamo chiudere il lavoro. Viviamo questa modernità in un contesto ambientale sempre più esposto al processo degenerativo dovuto agli effetti diretti e indiretti dell'inquinamento. Contemporaneamente non si è più disposti a perdere nulla del passato ed è per questo che la conservazione, di cui sono in primo luogo responsabili le istituzioni culturali, non può più risolversi soltanto ricorrendo al restauro, inteso come postumo atto riparatorio che ripristina una condizione di esistenza ipoteticamente ottimale e che pare sempre essere quella del passato. Per quanti cicli si può andare avanti così? Per quante volte il degrado può essere rigenerato, la materia disgregata tornare coesa, il distacco reso nuovamente solidale? In altre parole, il patrimonio culturale, aggredito da un clima modificato dallo stesso uomo che tenta di conservarlo, può vivere in eterno? Questo un interrogativo sul quale avrebbe senso affrontare una nuova ricerca.

8 - RASSEGNA BIBLIOGRAFICA

La prima fase del lavoro ha avuto come oggetto la stesura di una bibliografia tematica nata dall'analisi di lavori, studi, articoli scientifici con l'obiettivo di ottenere relazioni tra le concentrazioni di inquinanti, le condizioni climatiche e i differenti effetti di danno attesi, suddivisi per varie tipologie di materiali.

La rassegna bibliografica, così suddivisa in quattro sotto-categorie, è stata svolta attraverso la selezione e consultazione on-line di articoli scientifici in lingua italiana, inglese e francese tramite diverse fonti documentali, come ad esempio la piattaforma Researchgate, la raccolta di pubblicazioni di diversi enti di ricerca nazionali (ISPRA, CNR, ENEA..) ed internazionali (EEA) e l'attenta analisi delle normative tecniche.

I primi dati raccolti e analizzati pongono l'attenzione sugli istituti di ricerca che, incentrando la loro attività sul tema dell'inquinamento e del cambiamento ambientale forniscono informazioni e nozioni utili a comprendere il tema oggetto della ricerca. Tra questi è bene evidenziare:

- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change

Il principale organismo internazionale per la valutazione dei cambiamenti climatici. È stato istituito nel 1988 dalla World Meteorological Organization (WMO) e dallo United Nations Environment Programme (UNEP) allo scopo di fornire al mondo una visione chiara e scientificamente fondata dello stato attuale delle conoscenze sui cambiamenti climatici e sui loro potenziali impatti ambientali e socio-economici. Nello stesso anno, l'Assemblea Generale delle Nazioni Unite ha avallato l'azione di WMO e UNEP, istituendo l'IPCC. Esso esamina e valuta le più recenti informazioni scientifiche, tecniche e socio-economiche prodotte in tutto il mondo, e importanti per la comprensione dei cambiamenti climatici.

- CNR-ISAC Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima

L'ISAC è il principale Istituto del CNR per la ricerca nelle Scienze dell'Atmosfera e degli oceani, organizzato in 7 unità territoriali, 7 osservatori permanenti, che comprendono anche 2 Stazioni Globali del Programma Global Atmosphere Watch della World Meteorological Organization e 2 superstiti atmosferici.

- CMCC Centro euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici

Nato nel 2005 su iniziativa del Ministero dell'istruzione, dell'università e della ricerca (MIUR), del Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare (MATT), del Ministero delle politiche agricole e forestali (MIPAF) e del Ministero delle finanze (MEF), grazie al finanziamento del Fondo integrativo speciale della ricerca (FISR), il CMCC è un punto di riferimento istituzionale per decisioni politici, istituzioni pubbliche e aziende che si trovano nelle condizioni di richiedere supporto tecnico-scientifico sul clima.

- APAT Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi

Agenzia governativa nazionale italiana costituita per svolgere compiti e attività tecnico scientifiche di protezione dell'ambiente, tutela delle risorse idriche e difesa del suolo. Nata nel 1999 è oggi ricompresa in ISPRA (legge 133/2008)

- **FEEM Fondazione Eni Enrico Mattei**

È un'istituzione che svolge attività di ricerca sui diversi aspetti, in particolare economici, energetici e ambientali, dello sviluppo sostenibile e del cambiamento climatico, al fine di migliorare la qualità del processo decisionale pubblico e privato.

- **ICCG International Center for Climate Governance**

Fondato nel 2009, l'International Center for Climate Governance (ICCG) è un centro di ricerca nato per studiare le diverse tematiche relative ai cambiamenti climatici e alla governance del clima e promuove la divulgazione dei risultati della ricerca attraverso conferenze, convegni e pubblicazioni.

La ricerca bibliografica può essere così suddivisa in **macro-categorie** in funzione delle tematiche affrontate all'interno dei singoli testi:

- **Cambiamenti climatici ed inquinamento ambientale**
- **Funzioni dose-risposta**
- **Casi studio**
- **Conservazione e restauro**

RASSEGNA BIBLIOGRAFICA

EFFETTI DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI E DELL'INQUINAMENTO AMBIENTALE

Cozzolino C., *La valutazione economica degli impatti dell'inquinamento atmosferico nell'ambiente urbano.*

Descrizione di linee guida per la valutazione e la stima economica degli impatti ambientali e sociali.

Eyre N., Holland M., Walkiss P., *Impacts of air pollution on building materials*, settembre 2000.

Articolo in cui viene presentata una panoramica della metodologia utilizzata da ExternE [1998] per stimare il costo di danni dovuti all'inquinamento atmosferico sui materiali.

Lefèvre R. A., Ausset P., *The effects of atmospheric pollution on building materials: stone and glass*, in «Pollution Atmosphérique», n° 172, ottobre-novembre 2001.

Studio dell'alterazione che vetro e pietra subiscono a causa dell'inquinamento atmosferico.

Cassar M., Pender R., *The impact of climate change on cultural heritage: evidence and response*, in «14th Triennial Meeting The Hague Preprints», vol.2, pp. 610-616, 2002.

Analisi svolta nel 2002 per stabilire come il cambiamento climatico fosse una delle possibili cause dell'instabilità ambientale del patrimonio culturale.

Bonanni P., Cacace C., Giovagnoli A., Gaddi R., *Gli effetti dell'inquinamento atmosferico sui beni di interesse storico-artistico esposti all'aperto*, APAT – Dipartimento Stato dell'Ambiente e Metrologia ambientale, Servizio Inquinamento Atmosferico e Ambientale Urano, 2006.

Lo studio, dopo aver analizzato gli inquinanti pericolosi per i monumenti e la loro provenienza, si concentra sull'individuare la buona pratica di conservazione al fine di garantire la protezione e conservazione dei beni esposti all'aperto dal momento che la legislazione italiana riguardante le problematiche relative all'inquinamento atmosferico è attualmente mirata alla sola tutela della salute umana e degli ecosistemi.

Bonanni P., Daffinà R., Gaddi R., Giovagnoli A., Silli V., Cirillo M., *L'impatto dell'inquinamento atmosferico sui beni di interesse storico – artistico esposti all'aperto*, Rapporto APAT, 2006.

Studio eseguito dopo che nel 2007-2008 è stato conferito al Piemonte un riconoscimento in quanto regione più virtuosa nel gestire la qualità dell'aria. Lo studio, diviso in tre fasi, ha lo scopo di individuare il rischio di degrado del patrimonio culturale di Torino in riferimento ai livelli di inquinamento atmosferico registrati in quegli anni.

Augustin C., *Climate Change and World Heritage: report on predicting and managing the impacts of climate change on world heritage and Strategy to assist States Parties to implement appropriate management responses*, 2007.

Sabbioni C., *Arca di Noè: impatto dei cambiamenti climatici sul patrimonio culturale*, CNR – Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (ISAC), 2007.

Progetto Arca di Noè: progetto che si avvale della collaborazione di vari enti di ricerca specializzati nelle diverse tipologie di degrado e nei vari tipi di intervento di ripristino ad essi connessi. Lo scopo è quello di stimare i danni che subirà il patrimonio culturale nei prossimi 100 anni per ipotizzare uno scenario futuro. Dopo una suddivisione della ricerca in differenti fasi, l'elaborazione di mappe climatiche, il progetto prevede la

formulazione di linee guida per informare sugli effetti prodotti dai cambiamenti climatici sul patrimonio costruito.

Berenfeld m.I., *Climate change and cultural heritage: local evidence*, in «Climate change and cultural Heritage», vol. 25, n°2, 2008.

Sabbioni C., Cassar M., Brimblecombe P., Lefevre R.A., *Vulnerability of cultural heritage to climate change*, 2008.

Ricerca in cui viene evidenziato il ruolo che l'acqua ha come minaccia per il patrimonio dovuta a alluvioni, mareggiate e piogge intense che possono causare un sovraccarico nei tetti, nelle grondaie e penetrare all'interno dei materiali tradizionali. Contribuisce inoltre a depositare sostanze inquinanti sulle superfici dell'edificio e alla crescita e formazione di microrganismi su materiali come pietra e legno, nonché a influenzare la corrosione attraverso la deposizione di sali sulle superfici.

Roots O., *Materials corrosion and air pollution. Long-term studies at the Lahemaa monitoring station, Estonia*, in «Proceedings of the Estonian Academy of Sciences», vol. 57, 2, pp. 107-116, 2008.

Articolo in cui viene presentata la ricerca della stazione di monitoraggio estone Lahemaa sull'effetto del clima e dell'inquinamento atmosferico su materiali naturali e sintetici. Viene evidenziato come, nonostante l'inquinamento atmosferico in Estonia sia in costante calo, non è stata rilevata una riduzione significativa della corrosione sugli elementi presi a campione. Al contrario, dal 2001 al 2002 è stata registrata una diminuzione nella corrosione dello zinco rispetto al 1997-1998.

Chapuis M., *Preserving our heritage, improving our environment*, European Commission, vol. I, 2009.

Bonazza A. Brimblecombe P., Grossi M.C., Messina P., Sabbioni C., *Mapping the impact of climate change on surface recession of carbonate buildings in Europe*, Science of the Total Environment, 2009.

Il documento contiene delle mappe a livello europeo con indicate delle previsioni relative al degrado superficiale sulle pietre carbonatiche per il 21° secolo. Si deduce come il degrado superficiale aumenterà nel corso degli anni a causa di un incremento nella concentrazione di CO₂ in atmosfera.

Desiato F., Toreti A., Fioravanti G., Frascchetti P., Perconti W., *Baseline Climate Scenario, Climate trends and projections*, LIFE ACT Project 2010.

Brimblecombe P., Cassar M., Sabbioni C., *Atlas of climate change impact on European cultural heritage: scientific analysis and management strategies*, European Commission, 2010.

Il libro nasce da una ricerca della Commissione Europea e punta ad evidenziare i legami che intercorrono tra l'analisi dei cambiamenti climatici e il potenziale danno annesso al patrimonio culturale. Nelle appendici è possibile trovare maggiori riferimenti e richiami a dettagli di base scientifica. Le sezioni all'interno dell'atlante includono mappe climatiche, che mostrano i parametri climatici tradizionali rilevanti per il patrimonio culturale e specifiche climatologie del patrimonio.

Grossi M.C., *Potential damage to modern building materials from 21st century air pollution*, in «The Scientific World Journal», vol. 10, pp.116-125, 2010.

Stima sull'evoluzione del danno dei materiali da costruzione per il 21° secolo, con riferimento in particolare a alluminio, zinco, rame, plastica, vernice e gomma.

Garilli V., Wang Y., *Research on corrosion effects on materials in air pollution condition*, MATEC Web of Conferences, 2010.

All'interno di questa ricerca viene studiato l'effetto della corrosione sui metalli, la loro variazione di peso e di massa.

Brimblecombe P., Grossi C.M., Harris J., *Climate change critical to cultural heritage*, in «Survival and Sustainability. Environmental concerns in the 21st Century», pp. 195-205, 2011.

Studio basato sull'individuazione dei parametri climatici più dannosi per le superfici architettoniche e la loro catalogazione a seconda che siano collegati alla temperatura, al vento o all'acqua al fine di valutare i danni che il patrimonio storico potrebbe subire negli anni a venire.

Bonanni P., Cacace C., Cattani G., Cusano M., De Santis A., Di Menno Di Bucchianico A., Gaddi R., GIOVAGNOLI A., Sarti C., *Valutazione degli effetti dell'inquinamento atmosferico sui beni culturali architettonici di Roma*, Rapporto ISPRA, 2011.

Lo studio si concentra sull'analisi dell'erosione dei beni architettonici di Roma al fine di valutare ad oggi quali siano i beni maggiormente esposti all'aggressione e a rischio di erosione.

Giesen M. J., Ung A., Warke P., Christgen B., Mazel A., Graham D., *Condition assessment and preservation of open-air rock art panels during environmental change*, Journal of cultural heritage, vol. 15, no. 1 (2014 Jan-Feb), pp. 49-56 [English summaries], 6 figs. (4 color), 2 tables, 54 refs., 1 appendix., 2013.

Analisi svolta su 18 pannelli di arte rupestre per valutare se il loro tasso di deterioramento potesse aumentare col tempo, sebbene non sia chiaro se vi sia un legame con i fattori locali o con i cambiamenti ambientali.

Cacace C., Giovagnoli A., Gaddi R., Cusano M., Bonanni P., *Gli impatti dei cambiamenti climatici e dell'inquinamento sui beni culturali di Ancona*, Bollettino ICR no. 28, 2014, pp.47-67 [Italian w. English summaries], 28 color figs, 6 tables, 24 notes, 25 refs., 2014.

Lo studio realizzato per il patrimonio culturale di Ancona, nell'ambito del progetto LIFE ACT (Adapting to Climate Change in Time) si basa sull'analisi della vulnerabilità (stato di conservazione) di alcuni dei beni selezionati nella città e della pericolosità territoriale (potenziali impatti) stimata nello scenario attuale e in uno scenario futuro. La correlazione tra la vulnerabilità dei beni e la pericolosità calcolata a livello comunale, ha consentito di determinare, quali siano i monumenti di Ancona, tra quelli esaminati, da ritenere potenzialmente più a rischio al fine di individuare le opportune strategie di adattamento per la riduzione degli impatti.

Von Schirke S., Maus S., *Climate change as a threat to peace. Impacts on cultural heritage and cultural diversity*, Dresden papers on law and policy of the United Nations, 2014.

Volume in cui si analizza il cambiamento climatico considerandolo come una minaccia per la pace e, con i suoi impatti, per il patrimonio culturale.

Leissner J., Kilian R., Kotova L., Jacob D., Mikolajewicz U., Brostrom T., Ashley-Smith J., Schellen H.L., Martens M., Von Schijndel J., Antretter F., Winkler M., Bertolin C., Camuffo D., Simeunovic G., Vyhldal T., *Climate for culture: assessing the impact of climate change on the future indoor climate in historic buildings using simulations*, in «Heritage Science», vol. 3, n° 38, 2015.

L'articolo riporta i risultati del progetto "Climate for Culture", concentrandosi sull'implementazione dei modelli climatici regionali con nuovi strumenti di simulazione degli edifici al fine di prevedere le future condizioni climatiche all'interno e all'esterno dei medesimi.

Sabbioni C., Bonazza A, *Gli effetti dei cambiamenti climatici sul patrimonio culturale monumentale, la conoscenza dello scenario euro-mediterraneo per possibili azioni di mitigazione*, CNR-Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima, 2016.

Ricerca nata in seguito all'attenzione che il 5° Rapporto IPCC e i risultati della COP21 hanno portato sulle conseguenze causate dal cambiamento climatico sui monumenti storici. All'interno dell'articolo vengono prodotte mappe climatiche in funzione del danno, del rischio e del multirischio al fine di proporre possibili azioni di mitigazione nello scenario euro-mediterraneo.

Barbini F., Bonanni P., Cacace C., Cusano M., Di Giulio A., Gaddi R., Gargaruti C., Giovagnoli A., Fausti D., Listrani S., Sacco F., *Inquinamento atmosferico e beni culturali: effetti sui materiali a Roma*, Ispra-Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, 2017.

ISPRA e ISCR (Istituto Superiore per la Conservazione e il Restauro), in collaborazione con ARPA Lazio, hanno avviato nel 2013 una campagna di monitoraggio della durata di tre anni, a Roma, con lo scopo di analizzare i processi di annerimento e di degradazione di alcuni dei materiali costituenti il patrimonio culturale italiano. In particolare lo studio sperimentale è consistito nell'esposizione di campioni di marmo, rame e vetro in sette siti, in corrispondenza di sette centraline di monitoraggio della qualità dell'aria caratterizzate da differenti condizioni ambientali. Sui provini sono state condotte analisi colorimetriche periodiche per verificare le variazioni di colore causate dalla deposizione degli inquinanti, misure di differenze di peso. La sperimentazione ha permesso di definire l'andamento dei processi di annerimento del marmo e del vetro, di studiare la recessione superficiale del marmo e la corrosione del rame. Per quanto riguarda il marmo, è stato inoltre possibile confrontare i dati sperimentali ottenuti nel corso della campagna di monitoraggio con quelli ricavati applicando le funzioni dose-risposta presenti in letteratura.

Christodoulakis J., Tzani C., Varotsos C., Ferm M., Tidblad J., *Impacts of air pollution and climate on materials in Athens, Greece*, Atmos. Chem. Phys., 17, pp. 439-448, 2017.

Articolo in cui vengono descritti e analizzati i dati raccolti ad Atene nel periodo 2003-2012 dopo aver monitorato i livelli di corrosione di diversi materiali esposti all'inquinamento atmosferico. Si nota come il livello di corrosione dei materiali tenda a diminuire nel corso del tempo ad eccezione del rame. A partire da queste analisi sono state elaborate delle funzioni dose-risposta (DRF) considerando come "dose" la concentrazione di aria inquinante e come "risposta" la perdita di massa del materiale.

Mitra A., *Study material on air-pollution – for graduated students*, 2018.

Approfondimento preparato per un pubblico di studenti in merito al tema dell'inquinamento ambientale.

Hambrecht G., Rockman M., *International approaches to climate change and cultural heritage*, Energia, ambiente e innovazione,

Articolo in cui vengono citati esempi di comunità, di gestori di risorse e archeologi che stanno affrontando le minacce e gli impatti causati dai cambiamenti climatici sul patrimonio culturale.

Bonanni P., Cacace C., Daffinà R., Giovagnoli A., *Impatto dell'inquinamento ambientale sul patrimonio storico-artistico: definizione di carte tematiche di pericolosità ambientale-aria*, APAT e ICR di Roma.

Lavoro nato dalla collaborazione tra APAT e l'Istituto per il Restauro di Roma con lo scopo di determinare mappe tematiche di pericolosità ambientale-aria per il 24 comuni oggetto della ricerca. In questo testo vengono illustrati i passaggi che hanno portato a una prima definizione della mappa del rischio ambientale-aria relativo alla città di Roma.

Carraro C, Crimi J., Sgobbi A., *La valutazione economica degli impatti dei cambiamenti climatici in Italia e delle relative misure di adattamento*, Apat e CMCC, 2007.

Rapporto nato dalla sinergia fra APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici) e il CMCC (Centro Euro-Mediterraneo per i Cambiamenti Climatici), al fine di valutare economicamente gli impatti dei cambiamenti climatici e delle relative misure di adattamento.

Appolonia L., Borelli E., Natalini R., Santarelli M.L., *Determinazione dell'evoluzione delle croste in gesso mediante un modello matematico: analisi numerica e risultati sperimentali*, Il Congresso Nazionale IGILC – Lo Stato dell'Arte, maggio 2009.

Il lavoro si basa sull'elaborazione di un nuovo modello di studio per analizzare il progredire della formazione di gesso sulla superficie dei materiali lapidei per effetto dall'anidride solforosa presente in aria. Fino al momento della stesura della ricerca, il fenomeno veniva analizzato mediante lo sviluppo di "modelli di corrosione atmosferica" aventi origine dalla determinazione statistica del rapporto dose/risposta dei materiali. Questo studio vuole portare all'elaborazione di nuovi modelli numerici differenziali e quantitativi, basato sull'analisi numerica del modello e il confronto dei dati ottenuti sperimentalmente al fine di descrivere lo sviluppo del processo di solfatazione nel tempo, tenendo conto della geometria locale e delle differenti situazioni ambientali; valutazione resa impossibile con la tecnica adottata fino a quel momento. È stato perciò elaborato sperimentalmente un modello matematico in cui venivano descritte e simulate le croste di gesso su superfici calcaree, che, con successivi studi e sviluppi ancor più approfonditi, potrebbe essere impiegato per valutare lo stato di conservazione di una superficie monumentale e per determinare l'esigenza di interventi di restauro o conservazione nel tempo basandosi sulle condizioni di esposizione agli elementi atmosferici e inquinanti in esame.

Preradovic L., Ilic P., Markovic S., Janjus Z., *Meteorological Parameters and Pollution Caused by Sulfur Dioxide and Their Influence on Construction Materials and Heritage*, in «FACTA UNIVERSITATIS (NIS) SER.: ELEC. ENERG.», vol. 24, no. 1, April 2011, pp. 9-20.

Studio incentrato sugli effetti dell'anidride solforosa negli ambienti in cui vi è un'elevata densità di popolazione e traffico. Servendosi di una stazione di monitoraggio dell'aria e analizzando i dati da essa ottenuti è stato possibile valutare l'influenza che l'aria inquinata ha sul patrimonio edilizio.

F. Di Turo, C. Proietti, A. Screpanti, M. F. Fornasier, I. Cionni, G. Favero, A. De Marco, *Impacts of air pollution on cultural heritage corrosion at European level: What has been achieved and what are the future scenarios*, Environmental Pollution 218 (2016) p. 586-594

Applicazione delle funzioni dose-risposta su calcare, rame e bronzo a due scenari previsionali al 2030 attraverso l'uso del software Random Forests Analysis (RFA). Lo studio individua il PM₁₀ come principale fattore di degrado.

RASSEGNA BIBLIOGRAFICA

FUNZIONI DOSE-RISPOSTA

Watt J., Tidblad J., Kucera V., Hamilton R. (eds.), *The Effects of Air Pollution on Cultural Heritage*, Springer-Verlag US 2009.

Christodoulakis J., Tzanis C., Assimakopoulos M.N., Varotsos C., *A study of the corrosion and soiling effects on materials by air pollution*, Climate Research Group, Division of Environmental Physics and Meteorology, Facoltà di Fisica, NKUA, 2010.

Descrizione del progetto europeo Multi-asses in cui dei campioni di materiali metallici, pietra e cemento venivano esposti in una stazione installata su un edificio nel centro di Atene al fine di determinare gli effetti di corrosione e sporizia causati dall'inquinamento atmosferico.

Effects of Air Pollution on Materials and Cultural Heritage, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Corrosion, Volume 2012, Article ID 496321.

Ricerca che mostra, in seguito a studi svolti per 25 su materiali esposti in diversi ambienti climatici, come la corrosione del acciaio al carbonio, lo zinco e il calcare è ad oggi (anno 2012 della ricerca) sostanzialmente inferiore rispetto a 25 anni fa.

Karaca F., *An AHP-based indoor air pollution risk index method for cultural heritage collections*, in «Journal of cultural heritage», vol. 16, n. 3, pp. 352-360, 2015.

Studio di un nuovo modello di valutazione delle condizioni di inquinamento dell'aria basato su un processo analitico gerarchico (AHP).

F. Di Turo, C. Proietti, A. Screpanti, M. F. Fornasier, I. Cionni, G. Favero, A. De Marco, *Impacts of air pollution on cultural heritage corrosion at European level: What has been achieved and what are the future scenarios*, in «Environmental Pollution», vol.218, 2016, p. 586-594.

Lo studio ha come scopo quello di valutare e stimare le conseguenze che l'inquinamento dell'aria e le condizioni meteorologiche possono avere sul calcare, sul rame e sul bronzo. Le politiche volte a ridurre l'inquinamento atmosferico hanno ridotto la concentrazione di SO2 limitando il danno che esso apportava su questi materiali. Nonostante questo sono ancora numerosi i problemi che l'inquinamento ambientale porta con sé: la RFA (Random Forest Analysis) ha dimostrato come il PM10 sia il principale responsabile della corrosione che colpisce i materiali. Partendo da questi presupposti sono stati ipotizzati due scenari (chiamati Goth_Nath1 e TSAP) per valutare il livello di corrosione di calcare, rame e bronzo al 2030.

Livingston R.A., *Acid rain attack on outdoor sculpture in perspective*, in «Atmospheric Environment» vol. 146, 2016, p. 332-345.

Studio basato sulla correlazione esistente tra il ph presente all'interno delle piogge che colpiscono le sculture esposte all'aperto e la loro corrosione.

P. Watkiss, N. Eyre and M. Holland, A. Rabl - And N. Short *IMPACTS OF AIR POLLUTION ON BUILDING MATERIALS* Draft, 1 Sept. 2000

Nell'articolo si evidenzia come l'utilizzo di dati misurati per ricavare (tramite analisi regressive) funzioni dose-risposta con coefficienti determinati fa sì che esse siano valide soltanto alle condizioni sperimentali. Comunque la principale fonte di funzioni utilizzate qui, il lavoro per l'UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) di Kucera si basa sui risultati di 39 siti di test effettuati in varie nazioni europee e del Nord America. I risultati dovrebbero quindi essere applicabili ovunque poichè fanno riferimento a un ampio spettro di inquinamento e condizioni climatiche. Il lavoro di Kucera viene preferito ai risultati di altri sia per le dimensioni dell'area geografica nella quale i dati sono raccolti sia per la durata del programma sperimentale.

Chervenkov H., *Assessment of material deterioration in Bulgaria owing to air pollution*, in "J. Environment and Pollution", vol. 31, nos. 3/4, 2007.

Stima del tasso di deterioramento e degrado di otto materiali tecnologici in Bulgaria tramite l'analisi di funzionidose-risposta elaborate dall'ICP UNECE.

Peter Brimblecombe* and Carlota M. Grossi, *Potential Damage to Modern Building Materials from 21st Century Air Pollution – Noah's Ark*

Questo lavoro utilizza funzioni consolidate di danno o dose-risposta per una gamma di materiali che caratterizzano l'ambiente moderno costruito. Viene presa la pietra come riferimento perchè è stato fatto molto lavoro sulla risposta dei materiali carbonatici. Il danno alla pietra viene generalmente riportato come recessione in micron all'anno, ma per altri materiali si esprime in modi diversi, per cui è importante rimanere attenti a questo aspetto.

Christodoulakis J., Tzanis C., Varotsos C., Ferm M., and Tidblad J., *Impacts of air pollution and climate on materials in Athens, Greece*, Atmos. Chem. Phys, 17 , pp 439-448, 2017.

Articolo in cui vengono descritti e analizzati i dati raccolti ad Atene nel periodo 2003-2012 dopo aver monitorato i livelli di corrosione di diversi materiali esposti all'inquinamento atmosferico. Si nota come il livello di corrosione dei materiali tenda a diminuire nel corso del tempo ad eccezione del rame. Atene che ha importanti monumenti del patrimonio culturale (patrimonio culturale dell'UNESCO: Acropoli, Partenone), è stata coinvolta negli studi sui materiali ICP dal 2002 come sito campione, e ha anche partecipato al progetto UE MULTI-ASSESS (Modello per impatto multi-inquinante e valutazione dei livelli di soglia per il patrimonio culturale).

"International Co-operative Programme on Effects on Materials, including Historic and Cultural Monuments" UNECE – CHAPTER 4 Mapping Manual - edizione 2004 a cura di V.Kucera (ICP Materials Coordination Centre, Sweden)

Studi molto interessanti ed estesi che hanno portato alla definizione di numerose funzioni dose-risposta.

Vladimir Kucera & Johan Tidblad & Katerina Kreislova & Dagmar Knotkova & Markus Faller & Daniel Reiss & Rolf Snethlage & Tim Yates & Jan Henriksen & Manfred Schreiner & Michael Melcher & Martin Ferm & Roger-Alexandre Lefèvre & Joanna Kobus

UN/ECE ICP Materials Dose-response Functions for the Multi-pollutant Situation

Le funzioni dose-risposta adatte alla mappatura e ai calcoli del costo del danno da corrosione sono state sviluppate per la nuova situazione multi-inquinante per acciaio al carbonio, zinco, rame, bronzo e calcare esposti in posizione non riparata.

Sia il pH che la SO_2 sono inclusi in tutte le funzioni e questi parametri erano presenti anche nelle precedenti funzioni dose-risposta sviluppate per le situazioni dominanti della SO_2 . Le nuove funzioni dovrebbero essere utilizzate in situazioni multi-inquinanti, mentre le precedenti funzioni dei materiali ICP sono preferibili per le aree in cui SO_2 è l'inquinante dominante. Oltre alla SO_2 e alla pioggia acida, gli effetti dell' HNO_3 e del particolato sono stati inclusi per la prima volta nelle funzioni dose-risposta per i materiali metallici. NO_2 non è incluso direttamente in nessuna delle funzioni ma è strettamente correlato a HNO_3 , che è incluso per zinco e calcare. L'effetto del particolato è incluso per l'acciaio al carbonio, il bronzo ed il calcare.

RASSEGNA BIBLIOGRAFICA

CASI STUDIO

De Leo S., *Studio per la caratterizzazione petrografica dei materiali costituenti la facciata del Teatro Romano di Aosta*, relazione interna, Soprintendenza per i beni e le attività culturali della Regione Valle d'Aosta, 1989.

L. Robbiola, L. P. Hurtel, *Nouvelle contribution à l'étude des mécanismes de corrosion des bronzes de plein air: caractérisation de l'altération de bronzes de Rodin, Mémoires et études scientifiques revue de métallurgie* (1991) 809-824

Realini M., Negrotti R., Appolonia L., Vaudan D., *Deposition of particulate matter on stone surfaces: an experimental verification of its effects on Carrara marble*, *The Scienze of the Total Environment*, 1995.

Lo studio effettuato si basa sull'analisi e comparazione di fenomeni di degrado che colpiscono lo stesso materiale (marmo di Carrara) in due contesti ambientali differenti. Per due anni, ogni sei mesi, su una porzione di marmo di Carrara esposto all'aria aperta sia nella città di Milano che in quella di Aosta, sono stati effettuati degli studi e delle analisi chimiche e colorimetriche. Si è notato che in entrambi i casi si è assistito a un fenomeno di deposizione di materiale particolato sulla superficie del materiale, nonostante sia stato esposto in due ambienti differenti. Dalle analisi chimiche e gravimetriche effettuate è stato possibile ricavare un parametro di degrado per valutare le conseguenze derivabili dall'esposizione della pietra in diversi ambienti. Attraverso questo studio si è arrivati a comprendere come, in entrambi i casi, il marmo venga colpito da forme di degrado: annerimento superficiale, perdita di porzioni di materiale e formazione di gesso. Ciò accade sia per il marmo esposto ad Aosta sia per quello di Milano, nonostante vi siano delle differenze nella quantità di deposizione che nell'ambiente climatico. Stabilito D come parametro di decadimento del materiale e osservato come questo aumenti con l'aumentare del periodo di esposizione, è possibile definirlo come un parametro valido per stabilire il livello di degrado di un materiale in funzione dei fenomeni di deposizione.

Accardo G., Appolonia L., Negri A., Salonia P., Scardigli S., *An experimental correlation between factors for evaluation of damage and the monuments geometry: the case of the roman theatre at Aosta*, in «Atti del IV International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin», Rodi, 1997, vol.2, pp. 217-226.

Lo studio, basato sul teatro romano di Aosta, ha lo scopo di dimostrare come sia più facile comprendere i processi di degrado che colpiscono i monumenti attraverso la rappresentazione dell'opera stessa integrata:

- all'analisi della sua morfologia e della distribuzione del degrado,
- allo studio dei materiali che lo compongono, le loro caratteristiche fisiche e i fattori esterni

Ciò può essere considerata la fase fondamentale per una corretta pianificazione e organizzazione dei lavori di restauro e conservazione.

Appolonia L., Indone A., Migliorini S., Piccirillo A., *L'Arco di Augusto in Aosta: un esempio di percorso programmato tra progettazione e diagnostica*.

Studio svolto sull'arco di Augusto per acquisire i dati necessari alla comprensione dei fenomeni di degrado chimico, fisico e biologico funzionali all'intervento conservativo.

G. P. Bernardini, M. C. Squarcialupi, R. Trosti-Ferroni, M. Matteini, C. G. Lalli, G. Lanterna, M. Rizzi, I. Tosini, *The bronze doors of the baptistery in Florence: a comparative study of the bronze alloys and alteration products, Protection and Conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Cities* (2002) 43-47

Analisi dello stato di conservazione e dei fattori di degrado del battistero di Firenze, in correlazione con gli andamenti stagionali dell'inquinamento atmosferico e alle diverse esposizioni delle porte al traffico veicolare.

Appolonia L., Bertone A., Fambri L., Penati A., *Valutazione delle variazioni di congelamento dell'acqua all'interno di materiali porosi a seguito di trattamenti di conservazione sulla pietra: il caso romano di Aosta*, in Mascolo G. (a cura di), in «Restauro e conservazione dei beni culturali: materiali e tecniche», Atti. III Convegno, Idea Stampa Editore, 2003.

L'articolo affronta il tema della gelività, considerata una delle maggiori problematiche conservative che affligge i monumenti siti in ambienti tipici dell'arco alpino. Si è partiti considerando come caso studio il Teatro Romano di Aosta e, analizzando la temperatura di congelamento dell'acqua all'interno dei materiali che lo compongono e la sua variazione in seguito ai trattamenti di consolidamento con silicato di etile, si è giunti alla conclusione che l'impiego di tale materiale non risulta nocivo. Il silicato di etile tende infatti a limitare le tensioni dovute alla formazione del ghiaccio, spostando la temperatura di transizione verso valori inferiori rispetto a quella di congelamento.

Appolonia L., Bertone A., Fambri L., Penati A., *Valutazione delle variazioni di congelamento dell'acqua all'interno di materiali porosi a seguito dei trattamenti di conservazione sulla pietra: il caso del Teatro romano di Aosta*, in «Conservazione dei Beni Culturali: Materiali e Tecniche», Cassino (FR), 3-4 ottobre 2003.

Lo studio affronta il problema della conservazione dei monumenti esposti in ambienti tipici dell'arco alpino e della loro resistenza al gelo, prendendo in considerazione la temperatura di congelamento dell'acqua all'interno dei materiali e la loro variazione in seguito ai trattamenti di consolidamento con silicati di etile.

C. Saiz-Jimenez, P. Brimblecombe, D. Camuffo, R. Lefèvre, R. Van Grieken, *Damages caused to European monuments by air pollution: assessment and preventive measures*, London 2004.

Attraverso l'analisi di cinque casi studio si vogliono evidenziare gli effetti e i danni che l'inquinamento atmosferico può causare sulla superficie di monumenti storici.

Chervenkov H., *Assessment of material deterioration in Bulgaria owing to air pollution*, in «J. Environment and Pollution», vol. 31, nos. 3/4, 2007.

Stima del tasso di deterioramento e degrado di otto materiali tecnologici in Bulgaria tramite l'analisi di funzioni dose-risposta elaborate dall'ICP UNECE.

Bonanni P., Cacace C., Gaddi R., Giovagnoli A., *Calcolo del rischio territoriale e del rischio individuale per i beni di interesse storico-artistico a Torino*, Rapporto ISPRA, 2009.

Studio eseguito dopo che nel 2007-2008 è stato conferito al Piemonte un riconoscimento in quanto regione più virtuosa nel gestire la qualità dell'aria. Lo studio si divide in tre fasi ha lo scopo di individuare il rischio di degrado del patrimonio culturale di Torino in riferimento ai livelli di inquinamento atmosferico registrati in quegli anni.

I. Ozga, N. Ghedini, A. Bonazza, L. Morselli & C. Sabbioni, *The importance of atmospheric particle monitoring in the protection of cultural heritage*, Institute of Atmospheric Sciences and Climate, CNR, Bologna, Italy, University of Bologna, Italy, *Air Pollution XVII* p. 259-269, July 2009.

Studio basato sul monitoraggio della facciata del Battistero di Firenze al fine di evidenziare i danni e i cambiamenti superficiali dovuti all'inquinamento ambientale.

Appolonia L., Migliorini S., Ponziani D., *Studio Microclimatico sull'Arco di Augusto di Aosta*, in «*Bollettino n° 6*», Regione Valle d'Aosta, 2009-2010.

Studio inserito all'interno di un progetto avviato dalla Soprintendenza per conoscere i materiali, lo stato di conservazione e le condizioni climatiche che influiscono sullo stato di conservazione del bene. Oggetto dello studio è l'Arco di Augusto.

De la Fuente D., Vega J. M., Viejo F., Díaz I., Morcillo M., *City scale assessment model for air pollution effects on the cultural heritage*, in «*Atmospheric Environment*», vol. 45, art. 6, pp. 1242-1250, 2011.

Articolo che tratta del progetto multidisciplinare CULT-STRAT nato per relazionare gli effetti degli inquinanti atmosferici sul patrimonio culturale e le strategie possibile per mitigarli, valutandone le strategie di gestione per la manutenzione sostenibile e la conservazione preventiva. All'interno dell'articolo si fa riferimento alla città di Madrid attraverso l'elaborazione di mappe che mostrano scenari presenti e futuri (2010 e 2022) catalogando il patrimonio culturale presente per ogni materiale selezionato, analizzando la concentrazione di inquinanti e fenomeni di corrosione e recessione, evidenziando il superamento delle soglie di degradazione tollerabili.

Lopez Aparicio S., Smolik J., Maskova L., Souckova M., Grontoft T., Ondrackova L, Stankiewicz J., *Relationship of indoor and outdoor air pollutants in a naturally ventilated historical building envelope*, *Building and Environment*, vol. 46, pp. 1460-1468, 2011.

Analisi della concentrazione di NO₂, O₃, SO₂, acidi acetici e formici, HNO₃ e NH₃ all'interno e all'esterno di un edificio storico a Praga al fine di studiare il rapporto tra l'influenza dell'ambiente esterno sulla qualità dell'aria interna per valutare l'infiltrazione di inquinanti generati all'aperto.

V. Kontozova-Deutsch, F. Deutsch, R. H.M. Godoi, R. Van Grieken, K. De Wael, *Urban air pollutants and their micro effects on medieval stained glass windows*, in *Microchemical Journal* 99 (2011), pp. 508-513

Studio dello stato conservativo delle vetrate della cattedrale di Colonia e della qualità dell'aria interna ed esterna a confronto.

Appolonia L., Ferrero E., Migliorini S., Ponziani D., *Effects of temperature and humidity excursions and wind exposure on the arch of Augustus in Aosta*, In «*Journal of Cultural Heritage. A Multidisciplinary Journal of Science and Technology for Conservation and Awareness*», Elsevier, 2012.

All'interno dell'articolo vengono presentati i risultati di un monitoraggio microclimatico eseguito sull'Arco di Augusto, in particolare sulle quattro facciate e sotto la porzione voltata. I parametri analizzati al fine di dimostrare come vi siano delle differenze nel decadimento osservato nelle quattro facce del monumento, sono stati i seguenti: aria e temperatura superficiale, umidità relativa dell'aria, velocità e direzione del vento. Il rischio del danno, determinato dal verificarsi di cicli di gelo-scongelo, stress termico e fenomeni di condensa, viene stimato ponendo in relazione le condizioni microclimatiche a cui la porzione di monumento è esposta con i processi di danneggiamento che scientificamente colpiscono la pietra. Successivamente si compara il risultato ottenuto con la mappa del degrado e si procede con una discussione sulla correlazione presente tra tipologia di degrado e ambiente espositivo.

Appolonia L., Conz E., Galinetto P., Riccardi M.P., Tarantino S., Zema M., *Chromatic alteration of Roman Heritage in Aosta (Italy)*, in «Procedia Chemistry», dicembre 2013, pp.78-82.

Lo scopo dello studio in oggetto è quello di comprendere le ragioni delle alterazioni cromatiche che colpiscono la superficie delle rovine romane presenti ad Aosta nell'ultimo decennio e composte dalla puddinga, un materiale locale di origine fluviale composto da un conglomerato irregolare e non omogeneo che, solo negli ultimi cinquant'anni, ha iniziato a mostrare delle alterazioni cromatiche rossastre sulla sua superficie. Le prime analisi hanno dimostrato come queste variazioni cromatiche derivino dall'ossidazione di ioni ferrosi che penetrano all'interno del materiale poroso e, grazie alla presenza di acqua, liberano ematite all'interno del materiale colorando e indebolendone di conseguenza la superficie che tende così a sgretolarsi.

Acierno M., Cacace C., Giovanoli A., *La Carta del Rischio: un approccio possibile alla manutenzione programmata. Il caso di Ancona, 2014.*

La ricerca vuole indagare la possibilità di valersi di uno strumento già esistente, come la Carta del Rischio, per mettere a punto una strategia attiva finalizzata alla manutenzione, raramente portata a compimento in una realtà operante. Si è esplorata, in questo caso, la possibilità di affiancare, alla vocazione principalmente descrittiva e diagnostica della Carta, una potenzialità programmatica, finora inespressa, rivolta alla pianificazione di una cura vigile e attenta dei monumenti. La ricerca si è svolta nell'ambito del territorio della città di Ancona e il campione d'indagine è stato definito selezionando edifici che presentassero un discreto stato di conservazione o comunque problematiche di degrado incipienti tali da non richiedere un intervento di restauro.

Richard A. Livingston, *Acid rain attack on outdoor sculpture in perspective*, Atmospheric Environment 146 (2016) p. 332-345

Studio dei fenomeni di corrosione e abrasione del bronzo e delle pietre carbonatiche e sviluppo di modelli geochimici atti a comprendere l'incidenza dei fattori di degrado quali la deposizione secca e quella umida e loro applicazione su due casi studio negli U.S.A.. Lo studio dimostra l'effettiva applicabilità dei calcoli di bilanciamento della massa per correlazione con i processi climatici su questi due materiali, la netta superiorità dell'incidenza della deposizione secca su quella umida per quanto riguarda la corrosione superficiale e sottolinea anche che la presenza di acidi organici può effettivamente avere conseguenze sul degrado delle superfici.

RASSEGNA BIBLIOGRAFICA

CONSERVAZIONE E RESTAURO

M. Matteini, *Ossidazione della biacca in pitture murali. Metodi proposti per la riconversione del pigmento ossidato nelle pitture di A. Baldovinetti nella chiesa di S. Miniato a Firenze*, in Atti del convegno sul restauro delle Opere d'Arte, Florence, 2-6 novembre 1976, pp.257-269

Sacchi B., *Fenomeni di degrado fisici, chimici e biologici sui materiali lapidei*, Istituto per la Conservazione e la valorizzazione dei Beni Culturali.

Analisi delle tipologie di alterazione che le rocce possono subire

Appolonia L., Mariani D., Moltedo L., Salvetti O., *A new computer assisted diagnosis for the safe of ancient monuments*, in «EVA'97 Florence. Electronic Imaging & the Visual Arts. Conference Proceedings», 1997, pp. 20-29.

La ricerca si basa sull'individuazione di nuove tecniche informatiche, attraverso la descrizione di data base e algoritmi, che aiutino gli studiosi nelle analisi e nelle ricerche volte a preservare lo stato di conservazione dei monumenti antichi. Il progetto, nato da un gruppo multidisciplinare di studiosi, ruota attorno al teatro romano di Aosta e può essere così suddiviso in tre fasi:

- Sezione 1: descrizione dei dati raccolti
- Sezione 2: proposta di una nuova procedura di diagnosi dello stato di conservazione dell'oggetto studiato attraverso l'estrazione di porzioni di immagini con evidenti segni di degrado
- Sezione 3: elaborazione di un modello VRML del monumento analizzato

T. Yates, *Mechanisms of air pollution damage to brick, concrete and mortar*, in The Effects of Air Pollution on the Built Environment, Air Pollution Reviews, 2003, pp. 107-132

P. Letardi, I Trentin, G Cutugno (a cura di), *Monumenti in bronzo all'aperto. Esperienze di conservazione a confronto*, workshop Genova 2-4 dicembre 2004

Testo a stampa che raccoglie le diverse esperienze di restauratori e chimici nell'ambito della conservazione di bronzi all'aperto.

O. Doria, *Gli affreschi di villa imperiale di Terralba a Genova. L'uso della biacca, suoi processi di deterioramento e applicazione delle metodologie di riconversione*, in Atti del convegno scienza e Beni culturali, Bressanone 2005, pp. 1233-1240

C. Chiavari, A. Colledan, A. Frignani, G. Brunoro, *Corrosion evaluation of traditional and new bronzes for artistic casting*, Materials Chemistry and Physics 95 (2006) 252-259.

Appolonia L., Moltedo L., Picco R., Salonia P., *Innovative systems for assisted analysis and diagnosis*, XXI International CIPA Symposium, Athens, Greece, 01-06 October 2007.

Lo scopo della ricerca "SINDA" è quello di elaborare un sistema integrativo, costituito da componenti software e hardware, a sostegno delle analisi e diagnosi svolte dagli studiosi sullo stato conservativo di un monumento.

L'analisi dell'opera avviene mediante una "conoscenza attraverso immagini" resa possibile grazie alla realizzazione di un modello tridimensionale dell'oggetto in cui vengono fedelmente rappresentate e proiettate le porzioni colpite dal degrado. Tutti i dati raccolti per mezzo di questi frame sono contenuti ed elaborati all'interno di opportuni database e, messi in relazione tra i loro, possono automaticamente generare un'analisi relativa allo stato di conservazione dell'opera, all'estensione delle diverse tipologie di degrado e all'eventuale raggiungimento della soglia di rischio.

Lo studioso può servirsi del modello per selezionare, analizzare ed evidenziare le aree colpite dal degrado, associando ad ogni tipologia di danno, un differente colore. Questo metodo permette di:

- Sviluppare ed impiegare tecniche innovative di ricostruzione delle superfici analizzate
- Produrre correzioni delle immagini a colori ed elaborazioni che permettono di svolgere un'accurata analisi del degrado
- Utilizzare un approccio multi-scala e multidisciplinare per rappresentare ed elaborare dati geometrici

A. Russo, *La plastica come nuovo materiale dell'arte contemporanea, storia, proprietà chimico-fisiche, degrado, conservazione e restauro*, in VII Congresso Nazionale IGILC – Lo Stato dell'Arte – Napoli, 8-10 Ottobre 2009

Mehta P., *Science behind Acid Rain: Analysis of Its Impacts and Advantages on Life and Heritage Structure*, South Asian Journal of Tourism and Heritage, vol. 3. n° 2, gennaio 2010.

Dopo un'introduzione in merito alla genesi delle piogge acide, viene svolta un'attenta analisi sulle conseguenze che queste possono avere sulla sull'ecosistema, sull'uomo e sui monumenti storici.

F. Licenziati, R. Falcone, E. F. Orsega, M. Verità, *Studio preliminare sulla produzione e il degrado di vetri potassici e sodici come modelli di vetrate artistiche e di vetri industriali in ambiente confinato*, Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro, 2010, 3, pp. 7-17

Quagliarini E., Bondioli F., Goffredo G.B., Licciulli A., Munafò P., *Smart surfaces for architectural heritage: Preliminary results about the application of TiO₂-based coatings on travertine*, in «Journal of Cultural Heritage», vol.13, 2012, pp. 204–209.

Analisi dello sviluppo e dei trattamenti autopulenti sulle superfici in pietra tramite l'utilizzo di trattamenti a base di TiO₂ sul travertino rendendo bene evidenti gli effetti disinfettanti e autopulenti foto-indotti sulla superficie del materiale.

Chinna Rao G., Rajasekhar M., Venkat Rao, *Detrimental effect of Air pollution, Corrosion on Building Materials and Historical Structures*, American Journal of Engineering Research, vol. III, pp. 356-364, 2014.

Partendo dal fatto che l'economia di ogni paese sia collegata al problema della corrosione, lo studio si concentra sull'analizzare le conseguenze che questa forma di degrado ha sui materiali e sul patrimonio storico.

Matteini M., *Interventi di conservazione dei bronzi in ambiente urbano - Tecniche innovative di inibizione della corrosione*, in «Scienza e Beni culturali», vol. XXXI, 2015, Bressanone, Atti del convegno.

Descrizione degli interventi di restauro su opere in bronzo collocate in ambiente urbano, con particolare attenzione al problema dell'inibizione di corrosione.

Servizio di impostazione di una metodologia di valutazione degli impatti sul patrimonio culturale ed edilizio derivanti dalle misure individuate nell'ambito dell'azione WP4 del progetto ALCOTRA Climaera
 – Per conto della Sezione Aria e Atmosfera – ARPA Valle d'Aosta -

Bolzacchini E., Casati M., D'Angelo L., Ferrero L., Perrone M.G., Rovelli G., Sangiorgi G., *Experimental Measurements of Particulate Matter Deliquescence and Crystallization Relative Humidity: Application in Heritage Climatology*, Department of Earth and Environmental Sciences (DISAT), University of Milano, 2015.

Studio condotto per elaborare un metodo di valutazione del danno che può colpire i substrati lapidei per effetto del particolato atmosferico e del clima.

Kuzmichev A.A., Loboyko V.F., *Impact of Pollution Air on the Appearance of Buildings and Architectural Monuments in the Area of Town Planning*, International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2016.

Ricerca basata sullo studio parallelo degli aspetti fisici e visivi causati dall'inquinamento sui beni culturali. Lo studio si sofferma sull'analizzare l'aspetto emotivo legato alla percezione umana.

Ortiz R., Ortiz P., *Vulnerability index: a new approach for preventive conservation of monuments*, in «International journal of architectural heritage: conservation, analysis, and restoration», vol. 10, n.8, 2016, pp. 1078-1100 [English w. English summaries]. 9 color figs., 9 tables, refs.

Studio di un nuovo approccio per l'analisi della vulnerabilità dei monumenti basata sull'elaborazione di un modello a matrice.

Sesana E., Gagnon A. S., Bertolin C., Huges J., *Adapting Cultural Heritage to Climate Change Risks: Perspectives of Cultural Heritage Experts in Europe*, Geosciences 2018.

Studio sull'adattamento del patrimonio culturale ai cambiamenti climatici, tramite l'analisi di interviste condotte con esperti del Regno Unito, Italia e Norvegia. La maggior parte dei convolti ritiene che sia possibile l'adattamento del patrimonio culturale ai cambiamenti.

Hussein A., Al Anbari R.H., Hassan M.S., *Air pollutants mitigation by using various forms of photocatalytic cementitious coating materials*, in «Kufa Journal of Engineering», vol. X, N°1, gennaio 2019, pp. 56-67.

Studio concentrato sulla possibilità di impiegare il biossido di Titanio come materiale da costruzione per far sì che, reagendo con gli ossidi nitrici presenti in ambiente, si possano ridurre gli inquinanti atmosferici.

SITOGRAFIA

Progetto TECLA http://www.enrstandards.org/it/proj_tecla.html

Studio e sperimentazione di nanotecnologie per la protezione di superfici attraverso la deposizione a secco di ossidi di zinco e titanio.

TESI DI LAUREA

Bronzi e bronzi dorati esposti all'azione della pioggia: corrosione e inibizione, Corso di Laurea Magistrale in Chimica Industriale, Università di Bologna anno accademico 2011/2012, candidata: Serena Bassini

Studio interdisciplinare finalizzato al restauro della Fontana d'Ercole presso i giardini della Reggia di Venaria Reale, A. Carlone, Tesi di Laurea Magistrale, UniTo 2012-2013

Servizio di impostazione di una metodologia di valutazione degli impatti sul patrimonio culturale ed edilizio derivanti dalle misure individuate nell'ambito dell'azione WP4 del progetto ALCOTRA Climaera
– Per conto della Sezione Aria e Atmosfera – ARPA Valle d'Aosta -

PREZZARI

Restauro dei beni artistici ARI, DEI 2016

Prezzario Regione Piemonte 2018 sezioni: 1) Opere edili; 2) Recupero edilizio; 27) Restauro

9 – APPENDICE

9.1 Rassegna documenti aventi ad oggetto le funzioni dose-risposta per i materiali utilizzati in edilizia in funzione degli inquinanti e dei fenomeni atmosferici

Per quanto concerne l'aspetto degli indici di incidenza dei parametri meteorologici e di qualità dell'aria sull'entità dei danni attesi sui materiali da costruzione da applicare allo scenario ambientale, una prima rassegna si può trovare in **"Physical and economic damage functions for air pollutants by receptor - Ben-chieh Liu, Eden Siu-hung Yu _Midwest Research Institute- Kansas City – Missouri – EPA 600/5-76-011 September 1976.**

Lo studio fa seguito all'introduzione del Clean Air Act del 1970 che rappresenta la normativa fondamentale che fissa la disciplina sulla qualità dell'aria negli Stati Uniti. In particolare, la legge prevede che l'Environmental Protection Agency (Epa), l'agenzia per la protezione dell'ambiente statunitense, fissi standard nazionali di qualità dell'aria per determinati tipi di inquinanti.

Lo studio si propone di esaminare precedenti lavori di natura ambientale per stabilire se i risultati ottenuti possano essere utilizzati per determinare funzioni dose-risposta che, fornendo stime di buona approssimazione, possano essere utilizzate per valutare i risultati dello sviluppo di politiche ambientali alternative. Nello stesso tempo si auspica che nuovi studi economico ambientali vengano intrapresi, consentendo di ridurre le discordanze e consentire di ottenere funzioni dose-risposta più precise. Il rapporto intende stimare le funzioni di danno dose-risposta per vari recettori (salute umana, materiali da costruzione, vegetazione) in particolare per SO₂ e particolato.

Nel documento viene riportato che gli effetti dell'inquinamento dell'aria sui materiali sono ormai stati accertati dall'EPA. Fino a quel momento gli studi si erano concentrati sulla corrosione dei metalli trascurando altri campi. La maggior parte dei materiali mostra un alto grado di resistenza chimica agli ossidi di azoto mentre il biossido di zolfo ne attacca seriamente molti.

Mentre alcuni materiali (come il vetro) sono molto resistenti agli attacchi chimici degli inquinanti, alcune plastiche e materiali sono fortemente suscettibili di danno a causa di vari inquinanti.

Tra i diversi effetti dell'inquinamento dell'aria sui materiali troviamo la corrosione dei metalli, il deterioramento della gomma, lo sbiadimento delle vernici e lo sporco. Molti fattori esterni sembrano influenzare la velocità delle reazioni tra inquinanti e materiali e in particolare l'umidità accelera la corrosione. I gas inorganici sembrano causare appannamento e corrosione dei metalli e attaccano vari materiali da costruzione quali pietra, marmo, ardesia e malte, oltre a deteriorare una varietà di fibre naturali e sintetiche. L'effetto più notevole del particolato è lo sporco sulle superfici su cui si deposita, inoltre, agendo come catalizzatore, accelera l'azione corrosiva tra metallo e gas acidi. Un altro effetto negativo è dovuto ai danni apportati dalle pulizie necessarie per eliminare lo sporco.

Il valore del danno economico provocato ai materiali dall'inquinamento è difficile da accertare per la difficoltà di distinguere tra deterioramento naturale e deterioramento prodotto dall'inquinamento e

per l'incertezza riguardante i costi indiretti della precoce sostituzione di materiali consumati dall'eccessiva pulizia.

Nello studio vengono riportate le relazioni dose-risposta proposte da Haynie e Upham (1970) per la corrosione dello zinco:

$$\text{Zinc - corrosion} = 0,001028 (\text{RH}-48,8) \text{ SO}_2$$

dove RH è l'umidità relativa e SO_2 è la quantità di SO_2 espressa in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e la corrosione/erosione è espressa in μm

e da Spence, Haynie e Upham (1975) per l'erosione di vernice a base di olio:

$$\text{Paint - erosion} = 14,32 + 0.01506 \text{ SO}_2 + 0.03884 \text{ RH}$$

dove RH è l'umidità relativa e SO_2 è la quantità di SO_2 espressa in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e l'erosione è espressa in μm .

Studi molto interessanti ed estesi sono quelli compiuti nell'ambito del:

"International Co-operative Programme on Effects on Materials, including Historic and Cultural Monuments" UNECE.

Nel **MAPPING MANUAL** edizione 2004– **CHAPTER 4** a cura di V.Kucera (ICP Materials Coordination Centre, Sweden) vengono riportati numerosi indici:

Per i metalli:

acciaio resistente agli agenti atmosferici (tipo corten)

Weathering steel (C<0,12%, Mn 0.3-0.8%, Si 0.25-0.7%, P 0.07-0.15%, S<0.04%, Cr 0.5-1.2%, Ni 0.3-0.6%, Cu 0.3-0.55%, Al<0.01%)

$$\text{ML} = 34[\text{SO}_2]^{0.33} \exp\{0.020\text{Rh}\} 34[\text{SO}_2]^{0.13} \exp\{0.020\text{Rh}+f(\text{T})\}t^{0.33}$$

$$r^2 \quad 0.68 \quad N \quad 148$$

zinco

$$ML = 1.4[SO_2]^{0.22} \exp\{0.018Rh + f(T)\}t^{0.85} + 0.029Rain[H+]t$$

$$f(T) = 0.062(T-10) \text{ when } T \leq 10^\circ\text{C, otherwise } -0.021(T-10)$$

$$r^2 \quad 0.84 \quad N \quad 98$$

alluminio

$$ML = 0.0021[SO_2]^{0.23} Rh \exp\{f(T)\}t^{3.2} + 0.000023Rain[Cl^-]t$$

$$f(T) = 0.083(T-10) \text{ when } T \leq 10^\circ\text{C, otherwise } -0.032(T-10)$$

$$r^2 \quad 0.74 \quad N \quad 106$$

rame

$$ML = 0.0027[SO_2]^{0.32}[O_3]^{0.79} Rh \exp\{f(T)\}t^{0.78} + 0.050Rain[H+]t^{0.89}$$

$$r^2 \quad 0.73 \quad N \quad 95$$

bronzo

Bronze: Cu Sn6Pb7Zn5, ISO/R 1338 (Cu 81%, Sn 5.8%, Pb 6.7%, Zn 4.5%, Ni 1.6% + trace elements)

$$ML = 0.026[SO_2]^{0.44}Rh \exp\{f(T)\}t^{0.86} + 0.029Rain[H+]t^{0.76} + 0.00043Rain[Cl-]t^{0.76}$$

$$f(T) = 0.060(T-11) \text{ when } T \leq 11^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.067(T-11)$$

$$r^2 \quad 0.81 \quad N \quad 144$$

Per le pietre:

calcare

$$R = 2.7[SO_2]^{0.48}\exp\{-0.010T\}t^{0.96} + 0.019Rain[H+]t^{0.96}$$

$$r^2 \quad 0.88 \quad N \quad 100$$

arenaria

White Mansfiel dolomitic sandstone

$$R = 2.0[SO_2]^{0.52}\exp\{f(T)\}t^{0.91} + 0.028Rain[H+]t^{0.91}$$

$$f(T) = 0 \text{ when } T \leq 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.013(T-10)$$

$$r^2 \quad 0.86 \quad N \quad 101$$

Per le **resine**:

acciaio galvanizzato rivestito con melammina alchidica

$$L = [5/(0.084[SO_2] + 0.01Rh + f(T) + 0.00082Rain)]^{0.43}$$

$$f(T) = 0.040(T-10) \text{ when } T \leq 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.064(T-10)$$

$$r^2 \quad 0.73 \quad N \quad 138$$

pannelli in acciaio con resine alchidiche

$$L = [5/(0.033[SO_2] + 0.013Rh + f(T) + 0.0013Rain)]^{1/0.41}$$

$$r^2 \quad 0.68 \quad N \quad 139$$

where

ML = mass loss, $g \ m^{-2}$

R = surface recession, μm

t = exposure time, years

L = maintenance interval (life time), years

Rh = relative humidity, % - annual average

T = temperature, $^\circ C$ - annual average

[SO₂] = concentration, $\mu g \ m^{-3}$ - annual average

[O₃] = concentration, $\mu g \ m^{-3}$ - annual average

Rain = amount of precipitation, $m \ year^{-1}$ - annual average

[H] = concentration, $mg \ l^{-1}$ - annual average

[Cl] = concentration, $mg \ l^{-1}$ - annual average

r^2 coefficiente di correlazione

N numero di siti coinvolti nell'analisi

Assai interessante è anche la seguente tabella, che riporta il tasso di corrosione per anno di differenti materiali, risultante dalle misure delle esposizioni programma UNECE ICP

Table 4.1: Background corrosion rates K_b , expressed for a 1-year exposure period (1997-98), for different materials based on results from the UNECE ICP Materials exposure programme after 1, 2, 4 and 8 years of exposure.

| Material | 1-year background corrosion rate, K_b |
|------------------|---|
| Weathering steel | 72 g m ⁻² |
| Zinc | 3.3 g m ⁻² |
| Aluminium | 0.09 g m ⁻² |
| Copper | 3.0 g m ⁻² |
| Bronze | 2.1 g m ⁻² |
| Limestone | 3.2 µm |
| Sandstone | 2.8 µm |

Fa riferimento sempre al "International Co-operative Programme on Effects on Materials, including Historic and Cultural Monuments" UNECE:

IMPACTS OF AIR POLLUTION ON BUILDING MATERIALS

P. Watkiss, N. Eyre¹ and M. Holland - AEA Technology, UK

A. Rabl - Ecole des Mines de Paris

And N. Short - Aston Material Services, UK

Draft, 1 Sept. 2000

Nell'articolo si evidenzia come l'utilizzo di dati misurati per ricavare (tramite analisi regressive) funzioni dose-risposta con coefficienti determinati fa sì che esse siano valide soltanto alle condizioni sperimentali.

Comunque la principale fonte di funzioni utilizzate qui, il lavoro per l'UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) di Kucera si basa sui risultati di 39 siti di test effettuati in varie nazioni europee e del Nord America. I risultati dovrebbero quindi essere applicabili ovunque poiché fanno riferimento a un ampio spettro di inquinamento e condizioni climatiche. Il lavoro di Kucera viene

preferito ai risultati di altri sia per le dimensioni dell'area geografica nella quale i dati sono raccolti sia per la durata del programma sperimentale

Pietra naturale

Natural stone

ICP - unsheltered limestone (4 years) , stage I:

calcare non riparato

$$ML = 8.6 + 1.49 \text{ TOW } SO_2 + 0.097 \text{ H}^+$$

dove

TOW = fraction of time relative humidity exceeds 80% and temperature $>0^\circ\text{C}$

SO_2 = sulphur dioxide concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

H^+ = acidity ($\text{meq}/\text{m}^2/\text{year}$)

ICP - unsheltered calcareous sandstone or mortar (4 years), stage II:

arenaria calcarea o malta non riparata

$$ML = 7.3 + 1.56 \text{ TOW } SO_2 + 0.12 \text{ H}^+$$

dove

TOW = fraction of time relative humidity exceeds 80% and temperature $>0^\circ\text{C}$

SO_2 = sulphur dioxide concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

H^+ = acidity ($\text{meq}/\text{m}^2/\text{year}$)

ICP - sheltered limestone (4 years), stage III (without later damages such as exfoliation):

Calcare riparato

$$MI = 0.59 + 0.20 \text{ TOW } SO_2$$

dove

TOW = fraction of time relative humidity exceeds 80% and temperature $>0^\circ\text{C}$

SO_2 = sulphur dioxide concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

H^+ = acidity ($\text{meq}/\text{m}^2/\text{year}$)

ICP - sheltered sandstone (4 years), stage III (without later damages such as exfoliation):

Arenaria riparata

$$MI = 0.71 + 0.22 \text{ TOW } SO_2$$

dove

TOW = fraction of time relative humidity exceeds 80% and temperature >0°C

SO₂ = sulphur dioxide concentration (µg/m³)

H+ = acidity (meq/m²/year)

Vernici

Paint

Haynie - carbonate paint:

$$\Delta ER/tc = 0.01 P 8.7 (10-pH - 10-5.2) + 0.006 SO_2 f1$$

dove

ER = erosion rate (µm/year)

P = precipitation rate (m/year)

SO₂ = sulphur dioxide concentration (µg/m³)

f1 = 1-exp[-0.121 RH/(100-RH)]; RH = average relative humidity, %

Haynie - silicate paint:

$$\Delta ER/tc = 0.01 P 1.35 (10-pH - 10-5.2) + 0.00097 SO_2 f1$$

dove

ER = erosion rate (µm/year)

P = precipitation rate (m/year)

SO₂ = sulphur dioxide concentration (µg/m³)

f1 = 1-exp[-0.121 RH/(100-RH)]; RH = average relative humidity, %

Zinc and galvanised steel

Zinco e acciaio galvanizzato (non riparati)

ICP - unsheltered zinc (4 years):

$$ML = 14.5 + 0.043 TOW SO_2 O_3 + 0.08.H+$$

ICP - sheltered zinc (4 years):

Zinco riparato

$$ML = 5.5 + 0.013 TOW SO_2 O_3$$

ER = erosion rate ($\mu\text{m}/\text{year}$)

P = precipitation rate (m/year)

SO₂ = sulphur dioxide concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

O₃ = ozone concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

H+ = acidity ($\text{meq}/\text{m}^2/\text{year}$)

RH = average relative humidity, %

f1 = $1 - \exp[-0.121 \cdot RH / (100 - RH)]$

TOW = fraction of time relative humidity exceeds 80% and temperature $>0^\circ\text{C}$

ML = mass loss (g/m^2) after 4 years

MI = mass increase (g/m^2) after 4 years

L'articolo indica anche il valore di danno per cui è mediamente indicato di procedere ad interventi di manutenzione e riparazione:

Material Critical thickness loss

| | |
|--|------------------|
| Natural stone (pietra naturale): | 4 mm |
| Rendering (intonaco): | 4 mm |
| Mortar (malta): | 4 mm |
| Zinc (zinco): | 50 μm |
| Galvanised steel: (acciaio galvanizzato) | 50 μm |
| Paint (vernice): | 50 μm |

Alcune interessanti osservazioni vengono fatte sul calcestruzzo:

il cemento Portland, principale legante nella maggior parte dei calcestruzzi è un materiale alcalino che è suscettibile di attacchi acidi. I potenziali impatti sul calcestruzzo includono macchie/decolorazione, erosione superficiale, rottura e corrosione avanzata dell'armatura in acciaio. Comunque per tutti questi impatti (con l'eccezione della erosione superficiale) i danni sono più un risultato della carbonatazione naturale e dell'ingresso di ioni cloro piuttosto che l'azione di inquinanti come SO₂.

Il principale fattore che influenza la durabilità del calcestruzzo è la corrosione dell'armatura in acciaio. Nei calcestruzzi nuovi, le barre sono protette dalla corrosione acida dalle caratteristiche alcaline del cemento. Se il copriferro è sufficientemente spesso e il calcestruzzo di buona qualità, gli inquinanti incidono solo la superficie. Questa erosione superficiale non danneggia l'integrità strutturale e non ha quindi impatti sulla durabilità del calcestruzzo. Invece in calcestruzzi di bassa qualità, quando la carbonatazione ha portato alla corrosione dell'acciaio si creano fratture che consentono l'attacco del SO₂ poiché i prodotti della corrosione dell'acciaio occupano un volume più grande dell'acciaio stesso.

Infine quest'articolo presenta la metodologia usata da ExternE [1998] per stimare il costo del danno dell'inquinamento sui materiali. C'è un accordo generale sul fatto che la valutazione debba essere basata sulla willingness-to-pay (WTP) per evitare il danno. Si possono generalmente distinguere tre componenti di costo:

- spese per riparare l'oggetto danneggiato (per esempio pulizia o ritinteggiatura)
- misure preventive (per esempio l'uso di additivi anti-ozono per incrementare la resistenza all'ozono degli pneumatici)
- perdita di attrattività (vedere un edificio sporco)

il costo totale è rappresentato dalla somma di questi tre fattori.

Assessment of material deterioration in Bulgaria owing to air pollution Chervenkov H.

L'articolo è interessante poichè contiene alcune considerazioni generali sulle funzioni dose-risposta. Si riporta infatti che le funzioni dose-risposta per i materiali non protetti sono sempre del tipo:

$$K = \text{dry}(T, Rh, [SO_2], [NO_2], [O_3], t) + \text{wet}(\text{Rain}[H+], t)$$

dove K è l'attacco di corrosione, T è la temperatura in ° C, Rh è l'umidità relativa in percento, [] è la concentrazione in $\mu\text{g} / \text{m}^3$ (SO_2 , NO_2 e O_3), t è il tempo in anni, Rain è la quantità di precipitazione in mm e [H +] è l'acidità della precipitazione in mg / l.

A seconda del materiale, l'attacco alla corrosione può essere quantificato come perdita di massa (ML, g / m²), recessione superficiale (R, μm), ASTM D 1150-55 1987 (ASTM, 1-10), profondità di strato lisciviato (LL, nm) o aumento di peso (WI, $\mu\text{g} / \text{cm}^2$).

Potential Damage to Modern Building Materials from 21st Century Air Pollution Peter Brimblecombe* and Carlota M. Grossi - NOAH's ARK

FUNZIONI DI DANNO O DOSE- RISPOSTA

Questo lavoro utilizza funzioni consolidate di danno o dose-risposta per una gamma di materiali che caratterizzano l'ambiente moderno costruito. Viene presa la pietra come riferimento perché è stato fatto molto lavoro sulla risposta dei materiali carbonatici. Il danno alla pietra viene generalmente riportato come recessione in micron all'anno, ma per altri materiali si esprime in modi diversi, per cui è importante rimanere attenti a questo aspetto.

Pietra

La funzione di Lipfert è stata adottata in questo lavoro per la recessione della pietra, ma altre funzioni, come MULTI-ASSESS e ICP (derivate dai programmi MULTI-ASSESS e ICP delle Nazioni Unite) sono stati impiegate per studi a Londra e Praga in documenti precedenti:

$$-dx/dt = Lv \cdot Rn + 0.016[H+]Rn + 0.18(V_{dS} SO_{2(g)} + V_{dN} HNO_{3(g)})$$

dove $-dx / dt$ è il tasso di recessione in $\mu\text{m a}^{-1}$, Rn è la pioggia in m a^{-1} (presa come pioggia, non precipitazione, perché la neve è meno efficace per la dissoluzione), V_{dS} e V_{dN} sono velocità di deposizione ($0,38$ e $0,32 \text{ cm sec}^{-1}$), $SO_2(g)$ e $HNO_3(g)$ sono concentrazioni come $\mu\text{g m}^{-3}$ e $[H+]$ è la concentrazione nell'acqua piovana come $\mu\text{mol l}^{-1}$. Il termine Lv è il valore di Lipfert, che in genere è impostato a $18,8 \mu\text{m}$ (recessione) m^{-1} (precipitazione), ma qui è regolato per modificare la temperatura e la pressione parziale di CO_2 come in Bonazza et al.

Alluminio

Nell'architettura moderna, l'alluminio è un materiale importante. La perdita di massa dell'alluminio, Δm_t , nel tempo è determinata nel programma ICP come:

$$\Delta m_t = 0.0021SO_{2(g)}^{0.23} RH \exp(fAl)t^{1.2} + 0.023Rn c_{Cl} t$$

dove fAl è $0,031 (T-10)$ quando $T < 10^\circ\text{C}$ e $-0,061 (T-10)$ a $T > 10^\circ\text{C}$, c_{Cl} è la concentrazione di ione cloruro (mg l^{-1}) nell'acqua piovana e t è il tempo in anni. Notare la dipendenza non lineare di alcuni parametri.

Gli esponenti non interi del tempo, in particolare, rappresentano un problema, quindi i calcoli qui riportati per i metalli (e in seguito per alcuni materiali plastici) sono rappresentativi solo il primo anno di esposizione e sono quindi tassi iniziali.

Zinco

Lo zinco non è più molto usato nella sua forma pura negli edifici ma è stato abbastanza diffuso nel 19° secolo. Qui, le funzioni per la perdita di massa in aree non riparate (Δm_t) e riparate ($\Delta m'_t$) sono quelle adottate dallo studio ICP:

$$\Delta m_t = 1.35SO_{2(g)}^{0.22} \exp(0.018RH + f_{Zn})t^{0.85} + 0.029Rn[H+]t$$

dove f_{Zn} is $0.062(T-10)$ quando $T < 10^\circ\text{C}$ e $-0.021(T-10)$ con $T > 10^\circ\text{C}$.

$$\Delta m'_t = 0.058SO_{2(g)}^{0.16} RH \exp(f'_{Zn})t^{0.49}$$

dove f'_{Zn} is $0.039(T-10)$ quando $T < 10^\circ\text{C}$ e $-0.034(T-10)$ cont $T > 10^\circ\text{C}$.

La funzione MULTI-ASSESS assume invece la forma:

$$\Delta m_t = 1.82 + (1.71 + 0.471SO_{2(g)}^{0.22} \exp(0.018RH) \exp(f_{Zn}) + 0.041Rn[H+] + 1.37HNO_{3(g)})t$$

Rame

Il rame è ancora usato nelle costruzioni, sebbene sia anche un materiale tradizionale. Qui, adottiamo le funzioni per la perdita di massa in aree non riparate (Δm_t) e riparate ($\Delta m'_t$) dallo studio ICP

$$\Delta m_t = 0.0027SO_{2(g)}^{0.32} O_{3(g)}^{0.79} RH \exp(f_{Cu})t^{0.78} + 0.05Rn[H+]t^{0.89}$$

dove f_{Cu} is $0.083(T-10)$ quando $T < 10^\circ C$ e $-0.032(T-10)$ con $T > 10^\circ C$.

$$\Delta m'_t = 0.00045SO_{2(g)}^{0.28} O_{3(g)}^{1.16} RH \exp(f'_{Cu})t^{0.78}$$

dove f'_{Cu} is $0.033(T-10)$ quando $T < 10^\circ C$ e $-0.019(T-10)$ con $T > 10^\circ C$.

E' stato scelto -0.019 piuttosto che $+0.019$ del report originale, perchè sembra più corretto. La funzione MULTI-ASSESS assume la forma:

$$\Delta m_t = 3.12 + (1.09 + 0.002SO_{2(g)}^{0.4} O_{3(g)} RH60 \exp(f_{Cu}) + 0.0878Rn[H+]) t$$

dove $RH_{60} = RH - 60$ con $RH > 60$. Ancora una volta, c'è una dipendenza non lineare dal tempo e da altri parametri. La funzione del National Material Exposure Program (NMEP) è utilizzata come adottata da Brimblecombe e Grossi:

$$-dm/dt = 8.92 (2.2 + 0.025SO_{2(g)} + 37Rn)/4$$

Plastica

Esiste una grande quantità di letteratura sulla degradazione dei materiali polimerici ma è difficile da utilizzare per trattare i materiali impiegati nelle costruzioni ed esposti ad inquinanti ed agenti atmosferici. La quantità di radiazione solare e la temperatura sono fattori particolarmente importanti. Un'equazione semplice basata sul danno al polietilene esposto all'aperto è:

$$IR1 = 0,05 * T$$

dove IR1 è una misura degli spettri IR del polietilene, correlata al danno. Tuttavia, questo dipende solo dalla temperatura e non dalle concentrazioni di inquinanti. È difficile stabilire una chiara relazione tra l'esposizione al parametro IR1 e i danni al materiale.

Sono disponibili funzioni dipendenti dal tempo e dall'inquinamento per la valutazione profondità del danno sul poliuretano e il cambio di colore sul poliestere:

$$\Delta x = 0.5777 + 0.49G^{1/2}t^{1/2} + (0.1T/\pi)^{1/2}(0.023RH + 0.0184NO_{2(g)} + 0.0122O_{3(g)})t$$

$$\Delta E = 0.4383 + 0.5979(Gt^{0.4})^{1/2} + (0.1T/\pi)^{1/2}(0.0354RH + 0.0184SO_{2(g)} + 0.0195O_{3(g)})t^{0.65}$$

Anche qui il danno è stato determinato per il primo anno.

Vernice

Whitehouse suggerisce che un aumento di 30 ppb dell'ozono produce un aumento del 3% nel tasso di erosione della vernice per interni a base di olio e un aumento del 5% nel tasso di danni ai rivestimenti acrilici. Il programma ICP fornisce equazioni per il danno in termini di classifiche ASTM, in cui 10 è un nuovo campione e 1 è completamente degradato. Queste classifiche sono una valutazione del danno, ma per evitare la complessità qui, ci riferiamo semplicemente a loro come danno D dipendente dal tempo (cioè 10-ASTM) per acciaio zincato rivestito a spirale (cc) con melamina alchidica come:

$$D = (0.0084SO_{2(g)} + 0.015RH + f_{cc} + 0.82Rn)t^{0.43}$$

dove f_{cc} è $0.04(T-10)$ se $T < 10^{\circ}C$ and $-0.064(T-10)$ con $T > 10^{\circ}C$ e pannelli in acciaio (sp) con alchide come:

$$D = (0.033SO_{2(g)} + 0.013RH + f_{sp} + 1.3Rn)t^{0.41}$$

dove f_{sp} is $0.015(T-11)$ when $T < 11^{\circ}C$ and $-0.15(T-11)$ at $T > 11^{\circ}C$.

Gomma

Sono evidenti i danni causati dall'ozono alla gomma, e così è stato ben noto anche allo scopritore dell'inquinamento atmosferico fotochimico, Haagen-Smit. Holland et al. propongono che il reciproco del tempo per la prima comparsa di crepe ($1 / t_c$) può essere descritto come:

$$1 / t_c = re + kO_3 O_3$$

dove re è un fattore ambientale che include l'effetto di stress, luce solare e temperatura. Non è facile distinguerli come variabili nei calcoli, quindi in questa trattazione rappresenta essenzialmente l'effetto dell'ozono a temperature tipiche del laboratorio e in condizioni ombreggiate. Il parametro kO_3 è una costante di velocità e O_3 è la concentrazione di ozono in ppb. I valori re e kO_3 dipendono entrambi dal tipo di gomma e dal fatto che la formazione di crepe sia considerata ai bordi o meno. I valori di re e kO_3 adottati qui sono $19,5 \times 10^{-4} h^{-1}$ e $0.58 \times 10^{-4} h^{-1}$ per i bordi, e $17.1 \times 10^{-4} h^{-1}$ and $0.51 \times 10^{-4} h^{-1}$ per il centro di strisce di gomma.

Impacts of air pollution and climate on materials in Athens, Greece

John Christodoulakis¹, Chris G. Tzanis, Costas A. Varotsos, Martin Ferm, and Johan Tidblad

Atene che ha importanti monumenti del patrimonio culturale (patrimonio culturale dell'UNESCO: Acropoli, Partenone), è stata coinvolta negli studi sui materiali ICP dal 2002 come sito campione, e ha anche partecipato al progetto UE MULTI-ASSESS (Modello per impatto multi-inquinante e valutazione dei livelli di soglia per il patrimonio culturale: <http://www.corr-institute.se/multi-assess/web/page.aspx>).

Carbon steel

$$ML=51+1.39[SO_2]^{0.6} Rh_{60} e^{f(T)} +1.29Rain[H+]+0.593PM_{10}$$

$$f(T)=0.15(T-10), T <10^{\circ}C \text{ else } = -0.054(T-10), T \geq 10^{\circ}C$$

Zinc

$$ML=3.5+0.471[SO_2]^{0.22} e^{0.018Rh+f(T)} +0.041Rain[H+]+1.3[HNO_3]$$

$$f(T)=0.062(T-10), T <10^{\circ}C(2.1) \text{ else } = -0.021(T-10), T \geq 10^{\circ}C$$

Limestone

$$R=4+0.0059 [SO_2] Rh_{60}+0.054Rain[H+]+0.078[HNO_3] Rh_{60}+0.0258 PM_{10}$$

Weathering steel

$$ML=34[SO_2]^{0.13} e^{0.020Rh+f(T)}$$

$$f(T)=0.059(T-10), T \leq 10^{\circ}C(4.1) \text{ else } = -0.036(T-10), T > 10^{\circ}C$$

Copper

$$ML=4.21+0.00201[SO_2]^{0.4} [O_3]Rh_{60} e^{f(T)} + 0.0878Rain[H+]$$

$$f(T)=0.083(T-10), T \leq 10^{\circ}C \text{ else } = -0.032(T-10), T > 10^{\circ}C$$

Modern glass

$$H= (0.2215 [SO_2] +0.1367[NO_2]+0.1092PM_{10}) / (1+(382/t))^{1.86}$$

Carbon steel for Athens

$$ML=10+0.012[SO_2]^{2.152} Rh_{60} e^{f(T)} +1.29Rain[H+]+1.263PM_{10}$$

$$f(T)=0.15(T-10), T <10^{\circ}C \text{ else } = -0.054(T-10), T \geq 10^{\circ}C$$

Zinc for Athens

$$ML=3.5+0.004[SO_2]^{0.408} e^{0.082Rh+f(T)} +0.041Rain[H+]+0.138[HNO_3]$$

$$f(T)=0.062(T-10), T <10^{\circ}\text{C} \text{ else } = -0.021(T-10), T \geq 10^{\circ}\text{C} \text{ (8.2)}$$

Limestone for Athens

$$R=4+0.002[\text{SO}_2]\text{Rh}_{60}+0.054\text{Rain}[\text{H}^+]+0.05[\text{HNO}_3]\text{Rh}_{60}+0.106\text{PM}_{10}$$

Modern glass for Athens

$$H= (0.204[\text{SO}_2]+0.016[\text{NO}_2]+0.319\text{PM}_{10}) / (1+(382 / t)^{1.86})$$

dove

ML = perdita di massa per corrosione, g m^{-2}

R = recessione superficiale, μm (valori assoluti)

t = tempo di esposizione, in giorni

Rh = umidità relativa, % - media annuale

Rh_{60} = Rh – 60 dove Rh > 60, altrimenti 0

T = temperatura, $^{\circ}\text{C}$ - media annuale

$[\text{SO}_2]$ = concentrazione, $\mu\text{g m}^{-3}$ - media annuale

$[\text{O}_3]$ = concentrazione, $\mu\text{g m}^{-3}$ - media annuale

$[\text{NO}_2]$ = concentrazione, $\mu\text{g m}^{-3}$ - media annuale

Rain = quantità di precipitazione, mm anno^{-1} - media annuale

$[\text{HNO}_3]$ = concentrazione media annuale, $\mu\text{g m}^{-3}$

PM10 = concentrazione media annuale, $\mu\text{g m}^{-3}$

$[\text{H}^+]$ = concentrazione, mg l^{-1} - media annuale. L'unità di misura per $[\text{H}^+]$ non è quella usuale (mol l^{-1}) bensì la relazione tra pH e $[\text{H}^+]$ è qui $[\text{H}^+] = 1007,97 \cdot 10^{-\text{pH}} \approx 10^{3-\text{pH}}$.

Questo articolo viene riportato in quanto contiene considerazioni su studi effettuati in Italia, in particolare a Roma



Valutazione degli effetti dell'inquinamento atmosferico sui beni culturali architettonici di Roma

IL DEGRADO DEI BENI CULTURALI: L'EROSIONE

L'erosione (o recessione superficiale) dei materiali calcarei esposti all'aperto è generalmente quantificata in funzione delle deposizioni secche e umide degli inquinanti atmosferici (biossido di zolfo, ossidi di azoto e particolato atmosferico).

La recessione superficiale, espressa in $\mu\text{m}/\text{anno}$, viene calcolata mediante l'utilizzo di specifiche funzioni di danno presenti in letteratura.

A titolo di esempio si riportano, la formula di Lipfert e la funzione dose-risposta di Kucera derivata nell'ambito del progetto Multiassess1 (Model for multi-pollutant impact and assessment of threshold levels for cultural heritage).

Formula di Lipfert

$$R = 18.8 \cdot \text{Rain} + 0.016 \cdot [\text{H}^+] \cdot \text{Rain} + 0.18 \cdot (V_{dS} \cdot [\text{SO}_2] + V_{dN} \cdot [\text{HNO}_3])$$

con

R = recessione superficiale ($\mu\text{m}/\text{anno}$)

18.8 = coefficiente che rappresenta la solubilità di CaCO_3 in equilibrio con 330 ppm di CO_2

Rain = precipitazioni (mm/anno)

$[\text{H}^+]$ = concentrazione di ioni idrogeno (mg/l)

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

$[\text{SO}_2]$ = concentrazione del biossido di zolfo in aria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

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

$[\text{HNO}_3]$ = concentrazione di acido nitrico in aria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

in particolare:

- $18.8 \cdot \text{Rain}$: contributo della pioggia pulita (il cosiddetto effetto carsico)

Servizio di impostazione di una metodologia di valutazione degli impatti sul patrimonio culturale ed edilizio derivanti dalle misure individuate nell'ambito dell'azione WP4 del progetto ALCOTRA Climaera
 – Per conto della Sezione Aria e Atmosfera – ARPA Valle d'Aosta -

- $0.016 \cdot [H^+] \cdot \text{Rain}$: effetto della pioggia acida (acidità dovuta alla presenza di ioni SO_4^{2-} , NO_3)
- $0.18 \cdot V_{ds} \cdot [SO_2]$: deposizione di SO_2
- $0.18 \cdot V_{dN} \cdot [HNO_3]$: deposizione di HNO_3

Funzione dose-risposta di Kucera

$$R = 4 + 0.0059 \cdot [SO_2] \cdot Rh60 + 0.054 \cdot \text{Rain} \cdot [H^+] + 0.078 \cdot [HNO_3] \cdot Rh60 + 0.0258 \cdot [PM10]$$

con

R = recessione superficiale ($\mu\text{m}/\text{anno}$)

[SO₂] = concentrazione di biossido di zolfo, SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

[HNO₃] = concentrazione di acido nitrico, HNO_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

[PM10] = concentrazione di particolato atmosferico, PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Rh60 = umidità relativa Rh-60 (%)

[H⁺] = concentrazione di ioni idrogeno (mg/l)

Rain = precipitazioni (mm/anno)

in particolare:

- 4: valore calcolato sperimentalmente che rappresenta il degrado in assenza di inquinanti
- $0.054 \cdot \text{Rain} \cdot [H^+]$: effetto della pioggia acida
- $0.0059 \cdot [SO_2] \cdot Rh60$: deposizione di SO_2

Questo studio rappresenta una evoluzione dei precedenti in quanto viene considerato un maggior numero di inquinanti e l'azione combinata degli stessi.

UN/ECE ICP Materials Dose-response Functions for the Multi-pollutant Situation

Vladimir Kucera • Johan Tidblad • Katerina Kreislova •
 Dagmar Knotkova • Markus Faller • Daniel Reiss • Rolf Snethlage •
 Tim Yates • Jan Henriksen • Manfred Schreiner • Michael Melcher •
 Martin Ferm • Roger-Alexandre Lefèvre • Joanna Kobus

Received: 17 June 2005 / Revised: 26 January 2006 / Accepted: 12 February 2006 / Published online: 9 January 2007
 © Springer Science + Business Media B.V. 2007

Le funzioni dose-risposta adatte alla mappatura e ai calcoli del costo del danno da corrosione sono state sviluppate per la nuova situazione multi-inquinante per acciaio al carbonio, zinco, rame, bronzo e calcare esposti in posizione non riparata.

Sia il pH che la SO₂ sono inclusi in tutte le funzioni e questi parametri erano presenti anche nelle precedenti funzioni dose-risposta sviluppate per le situazioni dominanti della SO₂. Le nuove funzioni dovrebbero essere utilizzate in situazioni multi-inquinanti, mentre le precedenti funzioni dei materiali ICP sono preferibili per le aree in cui SO₂ è l'inquinante dominante. Oltre alla SO₂ e alla pioggia acida, gli effetti dell'HNO₃ e del particolato sono stati inclusi per la prima volta nelle funzioni dose-risposta per i materiali metallici. NO₂ non è incluso direttamente in nessuna delle funzioni ma è strettamente correlato a HNO₃, che è incluso per zinco e calcare. L'effetto del particolato è incluso per l'acciaio al carbonio, il bronzo e il calcare.

Funzioni dose risposta

Acciaio al carbonio

non esistono precedenti funzioni dose-risposta per l'acciaio al carbonio nel precedente "8 years ICP Materials exposure program". Esiste invece una funzione che descrive l'attacco da corrosione dopo un anno di esposizione:

$$r_{\text{corr}} = 1,77 [\text{SO}_2]^{0,52} e^{0,020\text{Rh}} e^{f(T)} + g(\text{Cl}^-, \text{Rh}, T)$$

dove R_{corr} è misurata in micron

$f(T) = 0,15 (T-10)$ quando $T < 10^\circ\text{C}$ altrimenti $0,054 (T-10)$ e $g(\text{Cl}^-, \text{Rh}, T)$ è una funzione che descrive l'effetto del deposito secco del cloro combinato con umidità relativa e temperatura. L'intervallo di temperatura usato per ricavare questa funzione è stato da -20 a $+30$ °C mentre il database dei multi

inquinanti include solo i valori tra zero e 25 °C. Dal momento che il dataset dei multi inquinanti è in accordo con questa funzione di temperatura è stato usato nella seguente funzione

$$ML = 29.1 + t^{0.6} (21.7 + 1.39 [SO_2]^{0.6} Rh_{60} e^{f(T)} + 1.29 \text{ Rain } [H^+] + 0.593 PM_{10})$$

Dove f (T) è fissato in 0,15 (T-10) quando T è minore di 10°C altrimenti 0.054 (T-10) e i parametri rimanenti sono dati nella tabella 2

Table 2 Parameters used in the statistical evaluation

| Parameter description | Abbreviation | Unit |
|---------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| Time | t | years |
| Temperature | T | °C |
| Relative humidity | Rh | % |
| Amount of precipitation | Rain | mm year ⁻¹ |
| pH of precipitation | pH | decades (dimensionless) |
| Acidity of precipitation ^a | [H ⁺] | mg l ⁻¹ |
| SO ₂ concentration | [SO ₂] | µg m ⁻³ |
| NO ₂ concentration | [NO ₂] | µg m ⁻³ |
| O ₃ concentration | [O ₃] | µg m ⁻³ |
| HNO ₃ concentration | [HNO ₃] | µg m ⁻³ |
| PM concentration (<10 µm) | PM ₁₀ | µg m ⁻³ |
| Mass loss | ML | g m ⁻² |
| Surface recession | R | µm |

^a Calculated directly from pH

Zinco

la funzione dose-risposta per lo zinco dal "8 years ICP Materials exposure program" è:

$$ML8\text{- year} = 1.4[SO_2]^{0.22} e^{0.018Rh} e^{f(T)} t^{0.85} + 0.029 \text{ Rain } [H^+]t$$

dove f(T)=0.62(T-10) se T<10°C altrimenti 0.021 (T-10)

dal momento che di nuovo il data sette dei molti inquinanti è in accordo con questa funzione di temperatura è stato usato nella seguente funzione:

$$ML = 1.82 + t (1.71 + 0.471[SO_2]^{0.22} e^{0.018Rh} e^{f(T)} t^{0.85} + 0.04 \text{ Rain } [H^+] + 1.37 [HNO_3])$$

La principale differenza tra la precedente funzione per gli otto anni e la nuova funzione per multi inquinanti è l'inclusione di HNO₃. Questa è la differenza tra lo zinco l'acciaio al carbonio per cui HNO₃ non è considerato. Questo si vede anche quando si compara l'attacco da corrosione nei siti di Milano e Parigi che hanno entrambi alti livelli di HNO₃ e l'attacco da corrosione dell'acciaio al carbonio è relativamente basso mentre l'attacco da corrosione dello zinco e anche del calcare, che è anche influenzato da HNO₃, è più alto.

Rame

la funzione dose-risposta per il rame dal "8 years ICP Materials exposure program" è:

$$ML8\text{- year} = 0.0027[SO_2]^{0.32} [O_3]^{0.79} Rhe^{f(T)} t^{0.78} + 0.050 \text{ Rain } [H^+]t^{0.89}$$

dove $f(T) = 0.83(T-10)$ se $T < 10^\circ C$ altrimenti $0.032 (T-10)$

dal momento che di nuovo il data set dei multi-inquinanti non è in disaccordo con questa funzione di temperatura è stato usato nella seguente funzione:

$$ML = 3.12 + t (1.09 + 0.00201[SO_2]^{0.4} [O_3] Rh_{60} e^{f(T)} + 0.0878 \text{ Rain } [H^+])$$

La funzione per il rame è molto simile a quella sviluppata precedentemente, che anche includeva l'ozono

Bronzo

la funzione dose-risposta per il bronzo dal "8 years ICP Materials exposure program" è:

$$ML8\text{- year} = 0.0026[SO_2]^{0.44} Rhe^{f(T)} t^{0.86} + 0.029 \text{ Rain } [H^+]t^{0.76} + 0.00043 \text{ Rain } [Cl]t^{0.76}$$

Dove $[Cl]$ è la concentrazione del cloro nelle precipitazioni (gl^{-1}) e $f(T) = 0.060(T-11)$ se $T < 11^\circ C$ altrimenti $0.067 (T-11)$. Dal momento che di nuovo il data set dei multi-inquinanti non è in disaccordo con questa funzione di temperatura è stato usato nella seguente funzione:

$$ML = 1.33 + t (0.00876[SO_2]^{0.4} e^{f(T)} Rh_{60} + 0.0409 \text{ Rain } [H^+] + 0.038 PM_{10})$$

La principale differenza tra le due funzioni è che l'effetto del cloro, espresso come deposizione umida, è stato sostituito con la deposizione del particolato, che può parzialmente rappresentare un sostituto per l'effetto del cloro

Calcare Portland

la funzione dose-risposta per il calcare Portland dal "8 years ICP Materials exposure program" è:

$$ML8\text{- year} = 2.7[SO_2]^{0.48} e^{-0.018T} t^{0.96} + 0.019 \text{ Rain } [H^+]t^{0.96}$$

Il data set dei multi-inquinanti è in disaccordo con questa funzione di temperatura e non si può stimare alcun effetto di temperatura. Invece un termine di umidità relativa è efficace sia per SO_2 che per HNO_3 .

$$R = 3.1 + t(0.85 + 0.0059Rh_{60}[SO_2] + 0.078 Rh_{60}[HNO_3] + 0.054 Rain [H^+] + 0.0258 PM_{10})$$

Le nuove funzioni dovrebbero essere usate in situazioni con multi-inquinanti, mentre le precedenti ICP Materials functions sono preferibili per le aree dove SO₂ è l'inquinante più diffuso. Nell'intervallo con una moderata concentrazione di SO₂ (0-20 µg per metro cubo) la differenza tra le due funzioni non è significativa. La differenza cresce ad alte concentrazioni di SO₂ (60-80 µg al metro cubo) dove la funzione lineare fornisce erroneamente valori più alti.

Conclusioni

funzioni dose-risposta adatte per la mappatura e la determinazione del costo del danno da corrosione sono state sviluppate nel caso dei multi-inquinanti per l'acciaio al carbonio, lo zinco, il rame, il bronzo e il calcare esposti in posizione non coperta. pH e SO₂ sono inclusi in tutte le funzioni e questi stessi parametri erano presenti nelle precedenti funzioni per ambienti con prevalenza di SO₂. Le nuove funzioni dovrebbero essere usate in situazioni con molti inquinanti mentre le precedenti funzioni "ICP materials" sono preferibili dove SO₂ è l'inquinante prevalente. Oltre a SO₂ e pioggia acida, gli effetti di HNO₃ e del particolato sono state per la prima volta incluse in funzione dose-risposta per materiali metallici. NO₂ non è inclusa in nessuna delle funzioni direttamente ma è strettamente legata a HNO₃, che è considerato per lo zinco e il calcare. L'effetto del particolato è considerato per l'acciaio al carbonio, il bronzo ed il calcare.

9.2 casi studio (Palazzo Mazzonis e Palazzo Madama)

9.2a PALAZZO MAZZONIS A TORINO: tipologia costruttiva e materiali non adeguati

Palazzo Mazzonis è una dimora signorile di origine seicentesca, in via San Domenico, nel centro di Torino, che dal 2008 ospita la sede del MAO - Museo di Arte Orientale. A partire dal maggio del 2018, a seguito della segnalazione di piccoli distacchi, sono state compiute verifiche delle facciate esterne del Museo lungo le vie Sant'Agostino e San Domenico. In quelle occasioni è stata riscontrata una situazione di distacchi puntuali, sia sulla struttura aggettante del cornicione che in corrispondenza di alcuni rigonfiamenti dell'intonaco di un anno.

Nell'agosto del 2019, a poco più di un anno dalle prime segnalazioni, si è svolta una nuova campagna di analisi riscontrando sui prospetti e sugli elementi aggettanti una perdita di coesione delle malte di altissima pericolosità, risolte in emergenza, nel corso delle poche ore disponibili, con rapidi distacchi. Una mappatura visiva dei fenomeni di degrado ha chiarito la natura dei lavori di restauro effettuati prima dell'apertura del Museo (5 dicembre 2008), quando, per ragioni di contenimento dei costi, furono compiute operazioni di sommario risarcimento. Ma soprattutto le malte utilizzate, tutte a base cementizia, hanno dimostrato fenomeni degenerativi, soprattutto per essere state investite da piogge orizzontali, degni di un manuale.

I danni del cemento sugli edifici storici sono oggetto di studio da molti anni. Le facciate del MAO si presentano come un patchwork temporale di riprese e di materiali quasi sempre utilizzati in modo improprio. Le malte di cemento possiedono caratteristiche molto diverse rispetto a quelle storiche (sono molto "più forti") con moduli elastici elevatissimi e non compatibili con la struttura muraria, in parte ancora intonacata a calce. Il loro impiego forma ancoraggi che in prima istanza risultano particolarmente tenaci e per questa ragione sono prodotti che facilmente vengono utilizzati, per incompetenza, nell'ambito dei cantieri edili.

Col tempo però, l'elevata impermeabilità e la mancanza di traspirazione al vapore, creano disomogeneità,



FESSURAZIONE E SOLLEVAMENTO
MALTA CEMENTIZIA DI RIPRISTINO ANNI 2000
MALTA PRECEDENTE PIÙ ANTICA

reazioni diverse alle variazioni climatiche, sollevamenti, cavillature, distacchi.

Ulteriore elemento aggravante per le facciate dell'edificio che ospita il Museo è l'utilizzo nel corso del restauro di una diffusa tinteggiatura acrilica. Le resine che aggregano questo tipo di vernice assicurano una grande facilità di utilizzo, anche da applicatori poco esperti, la rapida asciugatura e i costi contenuti tali da renderle particolarmente gradite alle imprese. Per questa ragione, queste pitture sono state, e purtroppo sono ancora, utilizzate senza cognizione anche negli edifici storici, sia esternamente che internamente, generando superfici pellicolate, incapaci di permettere la naturale traspirazione. La loro resa omogenea e piatta, uniformizza vecchie e nuove malte in un'unica superficie, che rapidamente avvia un processo irreversibile di deterioramento.

Da alcuni sopralluoghi effettuati nei giorni precedenti l'utilizzo della piattaforma e dalle osservazioni (non propriamente finalizzate) svolte nel corso delle usuali attività manutentive nel Museo, le facciate viste da terra dimostravano un progressivo processo degenerativo. In particolare, anche se analizzato da una certa distanza, lo spigolo tra le due vie espone fessurazioni diffuse, dall'alto al basso, sollevamenti della pellicola pittorica e situazioni di incoerenza marcata. Con il mezzo su via Sant'Agostino è stato possibile, visionare l'intera superficie della parete, pur nella brevità del tempo disponibile: la situazione presentava molteplici fattori di preoccupazione legati ai processi precedentemente descritti, tanto da dover intervenire



con puntuali distacchi. L'angolo tra le vie rappresenta il primo passaggio particolarmente pericoloso. Si tratta di un corpo pesante completamente di rifacimento in spessa malta (di bassissima qualità) priva di armature di aggrappaggio e pellicolata da un denso strato di vernice acrilica. Le precipitazioni, sempre più violente e concentrate di questi anni, hanno dilavato la facciata e attraversato i cretti. La conseguente azione degenerativa tra intonaco e supporto murario ha creato importanti linee di frattura dove i frammenti hanno abbandonato la loro sede con estrema facilità, innescando a catena un fenomeno di progressiva caduta di porzioni via via sempre più importanti.

Altro punto di fortissima preoccupazione le finestre dove uno dei tubi presenti per il mancorrente si è staccato nel corso dell'ispezione.



Altrettanto grave il piccolo cornicione decorativo che segue il profilo dell'intero edificio al piano nobile. L'ammaloramento era già visibile da terra, la situazione in quota si è presentata pericolosissima, le parti si sono staccate senza il minimo sforzo, con il semplice aiuto di un piccolo martelletto e a seguire con la sola forza delle mani.



L'incollaggio delle parti, frutto di restauri difficili da collocare nel tempo, mette in luce l'impiego di tecnologie non appropriate quali chiodi in ferro (aggrediti dall'ossidazione), probabili adesivi per prodotti ceramici, profili in materiale leggero (solo alcuni frammenti che probabilmente ritroveremo in altri tratti).

Diffusissimi infine i rigonfiamenti di estese porzioni di intonaco (senza dubbio con base cementizia). In gergo di cantiere diciamo che "suonano a vuoto". Non abbiamo insistito, avremmo ridotto la facciata in modo impresentabile, ma non possiamo assolutamente fidarci. A distanza di pochi mesi queste parti potrebbero sollevarsi ulteriormente, spaccare e ricadere a terra. Si



tratta per fortuna di spessori limitati ma anche in questo caso, a cascata e a lunga andare, trascinerrebbero dietro porzioni di muratura sottostante, la cui coesione non siamo in grado di verificare.

In quota la situazione della muratura ha presentato lo stesso problema riscontrato su via Sant'Agostino, fortissime cavillature, rigonfiamenti e distacchi. Si è deciso di intervenire puntualmente con alcune chiusure a malta per limitare le infiltrazioni. Si tratta di attività del tutto provvisorie, da rimuovere, se si riveleranno instabili, con il prossimo intervento di verifica.

Molto meno stabile su via San Domenico è il cornicione rispetto a quanto rilevato in via Sant'Agostino. Siamo stati costretti a rimuovere ampie porzioni di intonaco che presentavano sollevamenti e instabilità. La situazione preoccupa per i continui percolamenti dal tetto, la gronda, che è stata in parte revisionata negli attacchi, non assolve pienamente le sue funzioni e il forte degrado del manto di copertura non può far altro che riversare, soprattutto nei grandi temporali estivi, acqua sull'elemento aggettante.



Ritengo questa una delle situazioni più gravi per il peso degli elementi che potrebbero precipitare al suolo e che solo un intervento coordinato tra facciate e tetto può ripristinare una situazione di sicurezza.

IPOSTESI PER UN INTERVENTO: nuove tipologie e materiali, mantenimento del contesto storico

Le recenti ispezioni hanno suggerito in questi mesi alla Fondazione Torino musei, la programmazione di un intervento complessivo di risanamento di una situazione di forte degrado e che, non solo più puntualmente, sta avviando una fase di instabilità pericolose, dalle conseguenze difficili da prevedere. Tetto, facciate sulle vie San Domenico e Sant'Agostino, prospetti interni sul cortile richiedono un restauro profondo, capace di migliorare le prestazioni dell'intero involucro.



L'occasione di realizzare sistemi innovativi, come l'isolamento termico delle facciate, potrebbe costituire argomento molto appetibile per ottenere considerevoli vantaggi energetici, sgravi fiscali e rendere più appetibile l'operazione. L'edificio è chiaramente vincolato ma facciate e tetti sono tipologicamente molto lineari e questo costituisce un argomento di concertazione spendibile con la Soprintendenza. Secondo il D.Lgs.19 agosto 2005 n. 192, in- fatti, a proposito del rendimento energetico nell'edilizia, gli immobili soggetti a vincolo di tutela (secondo il D.Lgs. 42/2004), saranno oggetto di valutazione del MiBACT con l'ausilio degli gli organi a esso afferenti. Nel loro esercizio di funzione di tutela, le Soprintendenze valutano caso per caso quali interventi siano realizzabili e quali invece siano in contrasto con le esigenze conservative dell'immobile.

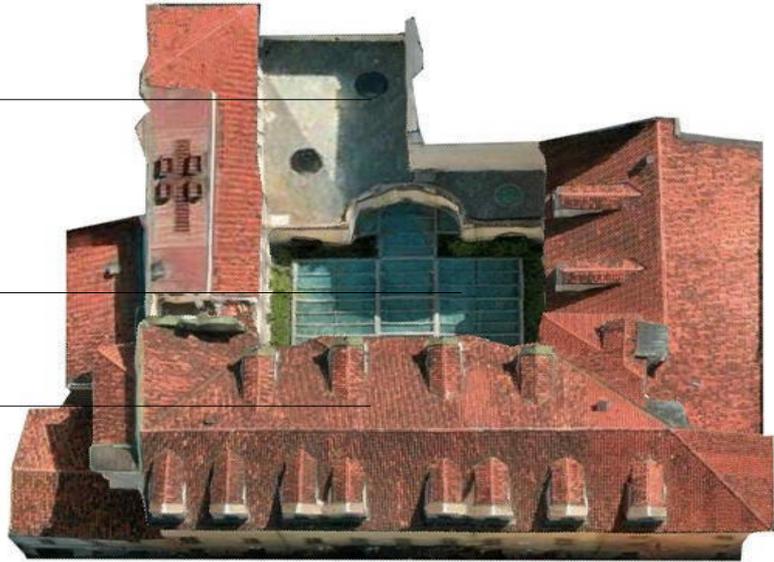
L'edificio che ospita il MAO presenta murature massicce, monolitiche, composte da un misto di pietra e laterizio: in inverno funzionano da isolante termico e contenimento delle dispersioni, in estate invece la dissipazione del calore in eccesso avviene grazie alla capacità dell'involucro di immagazzinare e riemettere calore con un certo sfasamento temporale. Purtroppo gli intonaci cementizi utilizzati nei ripetuti interventi, insieme all'applicazione di tinte acriliche e filmogene, hanno quasi completamente annullato questa proprietà di osmosi tra interno ed esterno. Solo la rimozione completa degli intonaci, ormai integralmente pellicolati dalle vernici, permetterà di ripristinare il funzionamento del sistema della muratura piena. Rimarrà il problema interno, dove i pessimi intonaci cementizi agiscono negativamente sulla traspirabilità

Anche per i tetti dell'edificio, sommariamente sistemati in occasione del riallestimento del Museo, è possibile sviluppare un progetto di risanamento dei manti abbinati a un opportuno efficientemente energetico.

TERRAZZO

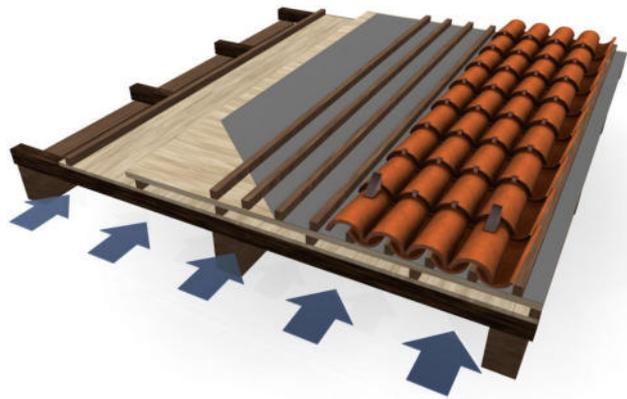
VOLUME

COPPI ALLA PIEMONTESE



La positiva esperienza di Palazzo Madama, con il complessivo risanamento delle coperture in coppi attuato nel cantiere del 2009-10, potrebbe essere ripetuta su Palazzo Mazzonis. Il modello di piazza Castello, approvato senza riserve dalla Soprintendenza, prevede un doppio tavolato di ventilazione con uno straordinario miglioramento delle condizioni climatiche del periodo estivo. Ogni singolo laterizio di copertura è ancorato da minuterie in acciaio inox che vincolano il sistema alla struttura

rendendola sicura nei confronti di ogni evento metereologico. Ma il manto storico rappresenta una finitura estetica, pur funzionale, in quanto il sistema di smaltimento delle acque è demandato a una guaina traspirante (Gore-tex) particolarmente efficace. Al MAO si può aggiungere un opportuno isolante, che insieme all'attività sulle pareti contribuisce a generare un sistema molto efficiente da un punto di vista energetico.



9.2b PALAZZO MADAMA A TORINO: conservare la bellezza, sfidare il tempo

Palazzo Madama è un edificio demaniale facente parte del sistema delle residenze sabaude ed iscritto dal 1997 nella lista del Patrimonio Mondiale Unesco, in Piazza Castello, nel pieno centro della Città di Torino. L'intero avancorpo architettonico progettato dall'architetto Filippo Juvarra nel 1718 necessita di un intervento radicale di restauro volto a preservare e tutelare non solo un esempio di plurisecolare bellezza torinese, ma per garantire l'incolumità dei fruitori del palazzo stesso e di coloro che transitano o sostano in prossimità.

Realizzata con marmo di Chianocco (pietra calcarea fragile e porosa, molto sensibile alle intemperie, agli sbalzi termici e alle infiltrazioni di umidità) la facciata ha iniziato, a partire dalla fine degli anni 2000, a manifestare piccole cadute di materiale lapideo; i controlli effettuati con il cestello mobile hanno evidenziato fin da subito uno stato di generale sofferenza della pietra, nonché la presenza di porzioni a rischio distacco negli architravi e nei capitelli della parte più alta dell'edificio.

Da quel momento, con cadenza semestrale, viene effettuata un'ispezione visiva dell'intera facciata del Palazzo accompagnata, ogni anno, da un controllo dello stato di conservazione dello scalone. Nel mese di marzo dell'anno 2015 è stato necessario produrre una relazione che non rilasciava certificato di idoneità statica della del prospetto principale dell'edificio, impedendo, di conseguenza, l'agibilità pubblica dello spazio antistante il Palazzo. A partire da quella data si è quindi imposta la presenza di un'area di rispetto invalicabile dal pubblico di almeno tre metri a protezione di eventuali distacchi del materiale, delimitata dalla presenza di grandi fioriere.

MATERIALI E CAUSE DEL DEGRADO

La facciata juvarriana si estende per circa 4000 mq ed è composta da materiali lapidei provenienti da diverse cave piemontesi. Le indagini diagnostiche effettuate da restauratori che hanno lavorato con l'ausilio di piattaforme aeree hanno fatto emergere fin da subito come il complesso sistema della facciata juvarriana si basi su un articolato equilibrio tra elementi originali e di rifacimento: la pietra di Chianocco (pietra di grana fine con porosità elevatissima, con le sue note fragilità), i prodotti messi insieme dopo i bombardamenti, negli anni che seguono la fine della guerra, aggrediti dal tempo, le parti intonacate, le lamiere, faldali,

converse, protezioni e pluviali. Questi eterogenei materiali si sono presentati fin dalla prima ispezione in una condizione di stabilità precaria aggravata dal fenomeno inarrestabile del bagnamento proveniente da una miriade di micro-infiltrazioni del tutto incontrollate che immergendo nell'umidità il sistema di ancoraggi metallici originali, purtroppo invisibili (quello che aggrappa alla muratura blocchi di pietra sfaldata), comporta livelli di rischio di difficile valutazione.

TIPOLOGIA DEI DEGRADI CHE HANNO COLPITO LA FACCIATA

ALVEOLIZZAZIONE DEL MATERIALE LAPIDEO



Sulla pietra di Chianocco di Palazzo Madama, l'alveolizzazione caratterizzata dalla presenza di cavità (alveoli) nel caso non particolarmente profondi, ha una distribuzione che rispecchia i luoghi a maggior esposizione agli agenti atmosferici¹. Il fenomeno è spesso spinto fino alla disgregazione e alla polverizzazione del materiale con distacchi particolarmente pericolosi.



Proprio grazie alla porosità naturale della pietra, accentuata dai danni provocati dalle aggressioni di un ambiente fino a non molti anni fa sottoposto a intensissimo traffico veicolare, è stato riscontrato un elevato contenuto di sali derivanti dal costante dilavamento delle superfici. I pori del materiale lapideo subiscono pressioni superiori alle capacità di

resistenza e conseguentemente si sfaldano. Nel caso specifico, l'esposizione della facciata a ovest, spesso investita da forti venti che seguono piogge o temporali, accelera il processo evaporativo delle acque all'interno degli alveoli e delle fessurazioni consentendo ai sali di cristallizzarsi anche in profondità provocando lesioni e disgregazione di ampie porzioni del materiale.

FESSURIZZAZIONI SU MATERIALE LAPIDEO E SU SUPERFICI INTONACATE

Parallelamente al fenomeno di alveolizzazione si possono osservare fenomeni di fessurizzazione che non riguardano solamente il materiale lapideo, ma anche le porzioni di facciata intonacate. Tra le cause principali vi sono il processo termoclastico o frammentazione per calore, i movimenti della struttura e i carichi statici distribuiti in modo non omogeneo.

Le elevate escursioni termiche a cui è sottoposta la facciata di Palazzo Madama inducono nei componenti dei materiali variazioni volumetriche, espansioni e contrazioni differenziali. Al coefficiente di dilatazione termica della pietra di Chianocco, si affiancano quelli delle altre componenti lapidee, dei tratti di muratura in mattone, delle malte (di diversa natura) e



degli aggraffaggi e rinforzi metallici.

I diversi materiali che lavorano a stretto contatto sono caratterizzati da un proprio coefficiente di dilatazione termica e rispondono singolarmente ad un aumento o a una

diminuzione di temperatura. Al loro variare si instaurano sollecitazioni meccaniche differenziate che ne causano la disgregazione.

La particolare esposizione della facciata induce gli elementi lapidei e non a sbalzi termici di una cinquantina di gradi (cosa documentata e non assai tipica in molte fasce climatiche). Essi possono subire variazioni dimensionali dell'ordine di qualche decimo di millimetro per metro di lunghezza e spesso non armonicamente a causa di zone di ombra e di sole oltre che ai diversi coefficienti di ciascuna materia.

Motivo di fessurazione sono poi gli stress meccanici dovuti ai pesi ingenti cui sono sottoposti i vari elementi. Questo aspetto non è del tutto trascurabile, soprattutto negli aggetti e nelle grandi trabeazioni sui pilastri dove già si intervenne nell'ultimo restauro del 2010. Nessuno dei materiali presenti, a parte i rinforzi metallici, è in grado di reagire elasticamente, le fessurazioni sono conseguenze inevitabili.



EFFLORESCENZE

Lungo tutta la facciata è possibile osservare fenomeni di idratazione dovuti al dilavamento diretto delle acque meteoriche che la colpiscono spesso frontalmente a causa della prevalenza di venti da ovest (Val di Susa).

A questa situazione si aggiunge il percolamento attraverso tratti sconnessi di faldaleria.

In un primo intervento di restauro risalente al 2010 si era sostituita tutta la superficie in corrispondenza dell'attacco della balaustra sulla sommità dell'edificio creando una superficie in acciaio pretrattato a zinco (Prelaq) che ha assolto molto bene alla sua funzione. Si tratta però solo di uno dei numerosi aggetti del complesso progetto di Juvarra: da questo punto si raccolgono le acque del tetto che confluiscono nei pluviali. Al di sopra di esso la balaustra presenta ancora il rivestimento in lastre di piombo modellate sul complesso andamento del mastodontico parapetto. Qui un insieme di modanature consente l'ingresso delle acque che penetrano nei giunti e imbibiscono sia il materiale lapideo che la muratura. Al di sotto di questo livello ci sono protezioni più precarie ma che non garantiscono la perfetta tenuta alle piogge.



L'aggressione di questi punti piuttosto diffusi consiste nell'assorbimento di acqua all'interno delle matrici lapidee. L'acqua è sia in grado di idratare la matrice cristallina determinandone un aumento di volume (in grado di indebolire la struttura) sia di trasportare all'interno delle porosità sali solubili (in particolare il gesso formatosi per solfatazione dei carbonati a seguito di piogge acide). Il gesso, parzialmente solubile, quando riprecipita può favorire il distacco dei



grani di materiale lapideo attraverso la crescita delle neoformazioni cristalline. Da qui l'effetto macroscopico di sfarinamento della pietra visibile in moltissimi punti al di sotto della vecchia faldaleria.

E' possibile, inoltre, riscontrare fenomeni di idrolisi con rottura di legami chimici dei carbonati

a causa delle acque meteoriche rese acide dalla dissoluzione dell'anidride carbonica. Il processo, sebbene lento, porta alla formazione di calcite secondaria. Tutti questi processi e la presenza di malte cementizie hanno come risultato la formazione di diffuse efflorescenze saline nelle porzioni della facciata maggiormente attaccata dalla pioggia e dalle infiltrazioni.

ESFOLIAZIONI E DISTACCHI

Alcuni distacchi di strati superficiali per esfoliazione, non propria della pietra di Chianocco, si affiancano a diffusi distacchi di strati profondi anche di porzioni molto importanti di materiale lapideo e in alcuni casi anche di superfici molto importanti di intonaco. Nel corso degli anni sono stati rimossi decine di frammenti più o meno grandi di pietra e partiture intonacate che non erano più in grado di sopportare il proprio peso. Con una certa costanza vengono ritrovate a terra varie porzioni di facciata e gli inverni più rigidi provocano la formazione dei cristalli di ghiaccio che in una materia particolarmente alveolizzata provocano i danni più accentuati.



CONCRETAZIONI E CROSTE

L'intera facciata è interessata da fenomeni di idratazione dovuti al dilavamento diretto delle acque meteoriche. E' possibile osservare la presenza, seppur limitata, di croste nere.

PERCOLAMENTO

Fenomeni di percolamento diffuso erano stati riscontrati già precedentemente all'intervento del 2010. In quella occasione si pose mano al sistema di faldaleria superiore, in corrispondenza dei vecchi doccioni che costituivano lo smaltimento delle acque delle coperture all'epoca della costruzione realizzando la faldaleria già citata precedentemente. Nuove situazioni di percolamento di acque meteoriche, soprattutto legate al degrado della faldaleria sistemata sugli aggetti, sono ancora evidenti dopo le operazioni del 2014, soprattutto in corrispondenza del piano nobile.



Le precipitazioni eccezionali che investono in modo sempre più frequente le nostre regioni hanno avuto in passato e hanno ancora oggi conseguenze devastanti sul patrimonio culturale, in particolare, nel caso in analisi, si rivelano essere una delle cause più gravi del degrado e delle infiltrazioni meteoriche.



Servizio di impostazione di una metodologia di valutazione degli impatti sul patrimonio culturale ed edilizio derivanti dalle misure individuate nell'ambito dell'azione WP4 del progetto ALCOTRA Climaera
– Per conto della Sezione Aria e Atmosfera – ARPA Valle d'Aosta -

PROGETTO ALCOTRA CLIMAERA

AZIONE WP4

VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO E DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI SUL PATRIMONIO CULTURALE

CIG Z802740C64



ALLEGATO: SCHEDE MATERIALI

ELENCO SCHEDE TECNICHE MATERIALI

ACCIAIO
ALLUMINIO
BRONZO
PIOMBO
RAME
ZINCO

ARENARIE-PUDDINGHE
GESSO
GRANITOIDI
MARMI-CALCARI
ROCCE BASICHE-PIETRE VERDI

CALCESTRUZZO-CEMENTO
INTONACO
LATERIZIO
VETRO

POLIMERI

| <i>Caratteristiche del materiale</i> | |
|--------------------------------------|--|
| Tipologia | Lega metallica |
| Composizione | <p>E' una lega ferrosa composta essenzialmente da ferro e carbonio, quest'ultimo in percentuale non superiore al 2,06%: oltre tale limite le proprietà del materiale cambiano e la lega assume la denominazione di ghisa.</p> <p>Le caratteristiche cambiano in funzione del tenore di carbonio.</p> <p>Gli acciai possono contenere altri elementi che ne variano le proprietà chimico-fisiche.</p> |
| Impiego | <p>I principali manufatti finiti di acciaio sono quelli laminati a caldo. Essi si distinguono in prodotti piatti e prodotti profilati.</p> <p>Del primo gruppo fanno parte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • le lamiere: prodotto in lastre piane con bordi liberamente espansi nella laminazione; • i larghi piatti; • i nastri. <p>I prodotti profilati sono i più utilizzati nel campo delle costruzioni e si distinguono in:</p> <ul style="list-style-type: none"> • acciai profilati: prodotto finito trafilato a caldo in barre diritte la cui sezione può essere a T a doppio T a H a U a L (angolari), ecc; • acciai in barre: prodotto finito trafilato a caldo che normalmente viene fornito in barre dritte: la sua sezione è normalmente circolare, ma può avere anche altre forme; • fili laminati: prodotto finito laminato e avvolto a caldo in rotoli. La sezione è normalmente circolare ma può avere anche altre forme. |
| Componenti | <p>Gli elementi di lega, naturalmente presenti nell'acciaio o aggiunti per conferire caratteristiche specifiche, determinano alcune modifiche delle proprietà chimico/fisiche del materiale, quali ad esempio:</p> <p>Fosforo (massima percentuale tollerata 0,05%) e zolfo (massima percentuale tollerata 0,05%):</p> <ul style="list-style-type: none"> - riducono la tenacità dell'acciaio, tuttavia, lo zolfo può essere inserito volontariamente per migliorare la lavorabilità all'utensile; - usato solitamente in combinazione con il manganese che forma solfuri di manganese (MnS) tondeggianti minimizzando la perdita di tenacità. <p>Azoto:</p> <ul style="list-style-type: none"> - promuove l'invecchiamento dell'acciaio al carbonio; - aumenta la resistenza al pitting negli acciai inossidabili; - aumenta la resistenza meccanica degli acciai inossidabili; - stabilizza l'austenite negli acciai inossidabili. <p>Manganese (massima percentuale tollerata 0,8%):</p> <ul style="list-style-type: none"> - agisce come desolforante e disossidante; |

- in alte percentuali aumenta il tasso di incrudimento;
- stabilizza l'austenite a bassa temperatura.

Alluminio:

- disossidante;
- affinante del grano.

Silicio (massima percentuale tollerata 0,4%):

- disossidante;
- aumenta l'elasticità.

Titanio:

- disossidante;
- denitrurante;
- affinante del grano;
- previene la corrosione intergranulare negli acciai inox.

Niobio e tantalio:

- essenziali negli acciai indurenti per precipitazione
- aumentano la resistenza meccanica;
- aumentano la resistenza a fatica;
- aumentano la resistenza a corrosione;
- aumentano la resistenza all'usura.

Molibdeno:

- aumenta la temprabilità;
- aumenta la resistenza a caldo;
- aumenta la durezza a caldo e la resistenza all'usura;
- aumenta la resistenza alla corrosione degli acciai inox, in particolare la resistenza al pitting;
- aumenta la resistenza meccanica ad alta temperatura;
- viene utilizzato con concentrazioni notevoli (9% circa) per produrre acciai per utensili.

Cromo:

- aumenta la temprabilità;
- aumenta la resistenza all'usura e alla corrosione;
- aumenta la stabilità al rinvenimento;
- con concentrazioni superiori al 12% è utilizzato negli acciai inossidabili ferritici e martensitici;
- aumenta la resistenza al "pitting".

Nichel:

- aumenta la resistenza e la durezza dopo la bonifica;
- aumenta di poco la temprabilità;
- partecipa alla resistenza alla corrosione dell'acciaio inox, dove raggiunge percentuali molto elevate (25% circa);
- stabilizza l'austenite a basse temperature.

Vanadio:

- aumenta la resistenza meccanica e la resistenza all'usura.

Tungsteno:

- aumenta la resistenza all'usura e la durezza;
- è impiegato con tenori che vanno dal 13 al 25% negli acciai rapidi per utensili.

Rame:

- può provocare cricche a seguito di lavorazioni a caldo;
- migliora la resistenza alla corrosione (acciaio Corten).

Fenomenologia generale del degrado

In linea generale si può affermare che storicamente, rispetto a quelle in calcestruzzo armato, le strutture in acciaio sono meno soggette ai danni provocati dall'invecchiamento e dal confronto con le sostanze presenti nell'atmosfera.

Questo è legato in primo luogo alle proprietà del materiale metallico, che risulta chimicamente meno vulnerabile e permeabile agli agenti esterni e in secondo luogo ai **metodi di realizzazione** delle strutture in carpenteria metallica rispetto a quelle in calcestruzzo armato. Le prime, per le caratteristiche del materiale soggetto a colatura e successiva laminazione, prevedono necessariamente la realizzazione dei vari elementi costitutivi in officina, con rigidi processi di controllo e con la possibilità di lavorare con precisione. Questo consente di ridurre al minimo tutti quei difetti propri della fase costruttiva che, possono poi comportare l'insorgere di fenomeni di degrado dell'acciaio legati all'interazione della struttura con l'ambiente esterno.

Il principale pericolo per il degrado dell'acciaio è rappresentato dal fenomeno dell'ossidazione. Questo, tuttavia, può essere evitato e controllato attraverso diversi metodi tra cui l'utilizzo di acciaio inossidabile o attraverso meccanismi protettivi come la zincatura o l'applicazione di vernici protettive che evitano il contatto diretto tra l'atmosfera e il materiale metallico. Inoltre, vista la discreta resistenza all'azione chimica, una delle principali cause di degrado dell'acciaio è rappresentata dall'azione dei **carichi** e dagli effetti che, nel tempo, questi possono avere sugli elementi costituenti la struttura.

Il principale fenomeno di degrado è quello della **corrosione** derivante dalla reazione elettrochimica tra l'acqua, l'ossigeno e il materiale ferroso: nel caso delle strutture in carpenteria metallica il problema della corrosione provoca la riduzione della sezione resistente con la conseguente diminuzione dei carichi sopportabili da parte dell'elemento interessato.

Sebbene per giungere a una riduzione significativa della resistenza sia necessario un discreto lasso di tempo, si evidenzia come la corrosione indisturbata, possa procedere a ritmi che si avvicinano ad 1 mm/anno, che per le dimensioni tipiche dell'ingegneria civile diventano considerevoli nel giro di pochi anni, soprattutto per quelle strutture progettate per lavorare ad elevati tassi di utilizzo.

La protezione nei confronti di questo tipo di fenomeno, nella maggior parte dei casi, è affidata al procedimento della **zincatura a caldo**. Questo consiste nell'immersione dell'elemento metallico in un bagno di zinco fuso, che garantisce la creazione di un sottile film di materiale in grado di prevenire il degrado dell'acciaio agendo da anodo, al posto di quest'ultimo, nella reazione di ossidazione.

Proprio per la natura della protezione offerta, che si attua attraverso la conservazione dell'acciaio tramite la fornitura di uno strato sacrificale, questo sistema non può essere considerato definitivo dal momento che, una volta consumato lo strato protettivo, esso andrebbe ripristinato al fine di mantenere un'adeguata protezione per l'elemento sottostante.

Il sistema sicuramente più efficace per prevenire la corrosione è rappresentato dall'utilizzo di **acciaio inossidabile**, tuttavia questa pratica non è pressoché mai contemplata nell'ambito dell'ingegneria civile, a causa del notevole costo di questo tipo di acciaio nei confronti di quello a più basso tenore di cromo.

Fattori di degrado**Fattori interni di degrado**

- eccessi di carico;
- mancato isolamento dall'ossidazione.

Fattori esterni (ambientali) di degrado

- PM₁₀ e SO₂ anche per l'acciaio resistente agli agenti atmosferici (tipo Corten);

| | |
|--|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> - umidità/precipitazioni (per l'attivazione della corrosione); - correnti galvaniche (se accoppiato a un metallo più nobile, quindi meno frequente nell'acciaio inox). |
|--|---|

Dose-risposta

Christodoulakis, Tzanis, Varotsos, Ferm, Tidblad (2016)

Carbon steel

$$ML = 51 + 1.39[SO_2]^{0.6} Rh_{60} e^{f(T)}$$

$f(T) = 0.015(T-10)$ when $T < 10^\circ C$, otherwise $-0.054(T-10)$ when $T \geq 10^\circ C$

Carbon steel for Athens

$$ML = 10 + 0.012[SO_2]^{2.152} Rh_{60} e^{f(T)} + 1.29 Rain [H^+] + 1.263 PM_{10}$$

$f(T) = 0.15(T-10)$ when $T < 10^\circ C$, otherwise $-0.054(T-10)$ when $T \geq 10^\circ C$

ML = mass loss by corrosion, $g m^{-2}$

$[SO_2]$ = annual average concentration, $\mu g m^{-3}$

Rh = annual average of relative humidity (%), $Rh_{60} = Rh - 60$ when $Rh > 60$, 0 otherwise

T = annual average temperature, $^\circ C$

$Rain$ = amount of precipitation, $\mu g m^{-3}$

$[H^+]$ = annual average concentration, $mg L^{-1}$

Kucera (2004)

Weathering steel (C<0,12%, Mn 0.3-0.8%, Si 0.25-0.7%, P 0.07-0.15%, S<0.04%, Cr 0.5-1.2%, Ni 0.3-0.6%, Cu 0.3-0.55%, Al<0.01%)

$$ML = 34[SO_2]^{0.33} \exp\{0.020Rh\} 34[SO_2]^{0.13} \exp\{0.020Rh + f(T)\} t^{0.33}$$

$f(T) = 0.059(T-10)$ when $T \leq 10^\circ C$, otherwise $-0.036(T-10)$

r^2 0.68 N 148

ML = mass loss, $g m^{-2}$

t = exposure time, years

Rh = relative humidity, % - annual average

T = temperature, $^\circ C$ - annual average

$[SO_2]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average

r^2 = coefficiente di correlazione

N = numero di siti coinvolti nell'analisi

Warkiss, Eyre, Holland, Rabl, Short (2000)

Zinco e acciaio galvanizzato non riparati ICP - unsheltered zinc (4 years):

$$ML = 14.5 + 0.043.TOW.SO_2.O_3 + 0.08.H^+$$

ML = mass loss, g/m^2 after 4 years

TOW = fraction of time relative humidity exceeds 80% and temperature $> 0^\circ C$

SO_2 = sulphur dioxide concentration, $\mu g/m^3$

O_3 = ozone concentration, $\mu g/m^3$

H^+ = acidity, $meq/m^2/year$

Interventi conservativi: principali operazioni manutentive

La manutenzione dell'acciaio non ha un prezzario di riferimento. La conservazione delle superfici consta nella pulitura ordinaria per la rimozione del particolato atmosferico e, se necessario, nel rinnovo del sistema di isolamento del metallo

esposto all'aria e all'acqua (ovviamente meno frequente nei casi di acciaio inox o Corten).

Bibliografia

F. Manzone, *Controllo e monitoraggio strutturale degli edifici*, 2018, Maggioli Editore

J. Christodoulakis, C. G. Tzanis, C. A. Varotsos, M. Ferm, J. Tidblad, *Impacts of air pollution and climate on materials in Athens, Greece*, Atmos. Chem. Phys. Discuss.196, 2016

International Co-operative Programme on Effects on Materials, including Historic and Cultural Monuments UNECE, 2004, a cura di V.Kucera (ICP Materials Coordination Centre, Sweden)

P. Watkiss, N. Eyre, M. Holland, A. Rabl, N. Short, *Impacts of air pollution on building materials*, Draft, 1 Sept. 2000

Sitografia: *L'acciaio inox a contatto con altri materiali metallici* su euro-inox.org

ALLUMINIO

| <i>Caratteristiche del materiale</i> | |
|--------------------------------------|---|
| Tipologia | Metallo |
| Composizione | L'alluminio è un elemento chimico con numero atomico 13. Il suo simbolo è Al |
| Impiego | <p>L'alluminio viene usato in molte industrie per la fabbricazione di moltissimi prodotti diversi.</p> <p>I componenti strutturali fatti in alluminio sono vitali per l'industria aerospaziale e molto importanti in altri campi dei trasporti e delle costruzioni nei quali leggerezza, durata e resistenza sono necessarie.</p> <p>Pur essendo l'alluminio uno degli elementi più diffusi sulla crosta terrestre (8,3% in peso) il metallo è stato isolato solo nella prima metà del XIX secolo e la sua produzione è divenuta economica solo alla fine dello stesso secolo. In natura si trova in minerali dove è sempre combinato con altri elementi.</p> |
| Descrizione | <p>L'alluminio è un metallo leggero ma resistente. La sua densità è di 2,71 g/cm³, a cui corrisponde un peso specifico di circa un terzo dell'acciaio e del rame.</p> <p>Altre proprietà salienti dell'alluminio sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> - eccellente resistenza alla corrosione e durata; il suo aspetto grigio argento è dovuto ad un sottile strato di ossidazione (detto "film di passivazione") che si forma rapidamente quando è esposto all'aria e che previene la corrosione bloccando il passaggio dell'ossigeno verso l'alluminio sottostante; - alta conducibilità termica ed elettrica (circa due terzi di quella del rame); - paramagnetico; - eccellente malleabilità e duttilità, grazie alle quali può essere lavorato facilmente; - elevata plasticità; - basso potere radiante; - non genera scintille per sfregamento; - superficie trattabile con ossidazione anodica o protettiva (passivazione chimica e aumento della durezza superficiale) o estetica (elettrocolorazione). |
| Componenti | Quando si combina con altri elementi, le caratteristiche di questo metallo, che allo stato puro è tenero e duttile, cambiano radicalmente. Ad esempio l'ossido di alluminio (Al ₂ O ₃) o corindone (i cristalli trasparenti della migliore qualità sono più conosciuti come |

| | |
|--|--|
| | <p>zaffiri e rubini), è la sostanza naturale più dura dopo il diamante (9 nella scala di Mohs).</p> <p>Gran parte degli elementi metallici sono solubili nell'alluminio, le leghe madri sono formate con:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Silicio: migliora la colabilità e riduce il coefficiente di dilatazione; nelle leghe ipereutettiche (Si>12%) conferisce alla lega un certo potere autolubrificante. • Magnesio: aumenta la resistenza alla corrosione in ambiente alcalino e in mare; aumenta il grado di incrudimento e di conseguenza le caratteristiche meccaniche conferibili al materiale per deformazione a freddo. • Manganese: aumenta la resistenza meccanica e alla corrosione anche se in maniera più contenuta del magnesio; è elemento fondamentale per ridurre la formazione di precipitati ferrosi aghiformi (noti come "punte di spillo"). • Rame: accresce la resistenza meccanica, soprattutto a caldo, la resilienza e la resistenza a fatica; rende non saldabile la lega. • Zinco: soprattutto se associato al magnesio, conferisce un'elevata resistenza meccanica, migliora la temprabilità delle leghe (con Zn>4% e Cu<1% si ottengono leghe autotemperanti), ma riduce la resilienza e l'elasticità del materiale. • Nichel: accresce la resistenza meccanica a caldo. <p>Accanto ad questi metalli si possono impiegare elementi alliganti in piccole percentuali: titanio, zirconio, cromo, bismuto, piombo, cadmio, scandio, litio, berillio ed anche stagno e ferro, quest'ultimo peraltro sempre presente come impurezza.</p> |
|--|--|

Fenomenologia generale del degrado

L'alluminio è resistente alla maggior parte dei tipi di corrosione, compreso l'attacco dei composti di zolfo. Si combina rapidamente con l'ossigeno per formare un velo trasparente e fortemente aderente di ossido che è relativamente inerte ai successivi attacchi chimici.

Le leghe di alluminio non soffrono di corrosione di tipo generalizzato, ma di fenomeni come la tensocorrosione, la corrosione localizzata (pitting), la corrosione per sfregamento (fretting) e quella galvanica. Tipicamente la protezione dalla corrosione si consegue mediante anodizzazione o l'applicazione di clad o di vernici protettive (primer). Spesso come rivestimento protettivo su una lega di alluminio viene utilizzato l'alluminio puro. Per garantire la resistenza a corrosione dello strato di alluminio esterno, si deve ricorrere a placcatura a freddo.

Fattori di degrado

| | |
|--|--|
| Fattori interni di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - Presenza di impurità nella lega, od alte percentuali di metalli ossidabili (es. ferro) - eccesso di carico costante - accoppiamento con materiali inidonei |
| Fattori esterni (ambientali) di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - Temperatura elevata - umidità/precipitazioni - SO², Cl⁻ e PM₁₀ |

| Dose-risposta | |
|--|---|
| Brimblecombe, Grossi (2010) | $\Delta mt = 0.0021SO_2(g)^{0.23}RH \exp(fAl)t^{1.2} + 0.023Rn c_{Cl} t$ $fAl = 0,031 (T-10) \text{ quando } T < 10^\circ\text{C e } -0,061 (T-10) \text{ a } T > 10^\circ\text{C,}$ <p>c_{Cl} = concentrazione di ione cloruro (mg l^{-1}) nell'acqua piovana t = tempo in anni</p> |
| Kucera (2004) | $ML = 0.0021[SO_2]^{0.23}Rh \cdot \exp\{f(T)\}t^{2.2} + 0.000023Rain\{Cl\}t$ $f(T) = 0.083(T-10) \text{ when } T \leq 10^\circ\text{C,} \quad \text{otherwise -}$ $0.032(T-10)$ <p>r^2 0.74 N 106 ML = mass loss, $g m^{-2}$ t = exposure time, years Rh = relative humidity, % - annual average T = temperature, $^\circ\text{C}$ - annual average $[SO_2]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average $[O_3]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average r^2 = coefficiente di correlazione N = numero di siti coinvolti nell'analisi</p> |
| Interventi conservativi: principali operazioni manutentive | |
| La manutenzione dell'alluminio non ha un prezario di riferimento. La conservazione delle superfici consta nella pulitura ordinaria per la rimozione del particolato atmosferico o nella sostituzione di parti. | |
| Bibliografia | |
| P. Brimblecombe, C. M. Grossi, <i>Potential Damage to Modern Building Materials from 21st Century Air Pollution</i> , NOAA's ARK, 2010 <i>International Co-operative Programme on Effects on Materials, including Historic and Cultural Monuments</i> UNECE, 2004, a cura di V.Kucera (ICP Materials Coordination Centre, Sweden) William B. Frank, Warren E. Haupin, <i>Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, "Aluminium"</i> , Wiley-VCH, 2000 | |

| | |
|--------------------------------------|--|
| SCHEDA TECNICA DEL MATERIALE | BRONZO |
| Caratteristiche del materiale | |
| Tipologia | Lega metallica |
| Composizione | Lega di rame e stagno e minerali accessori. Dal XX sec. d.C. il silicio sostituisce lo stagno per le applicazioni industriali. |
| Impiego | <p>Il bronzo è molto usato dagli scultori per le loro opere, perché molte leghe di bronzo hanno l'insolita e molto utile proprietà di espandersi lievemente poco prima di solidificare, riempiendo ogni minimo vuoto dello stampo che le contiene. Questo permette, nella scultura finita, di rendere perfettamente ogni minimo dettaglio del lavoro dell'artista.</p> <p>Utensili, armi e corazze (sin dall'epoca del bronzo: 3200-600 a.C.), monete, medaglie e sculture (per getti a conchiglia o cera persa (con tenore Sn 3-8%), campane (tenore Sn 19-22%), palle di cannone, ingranaggi e organi di trasmissione (tenore Sn 8-12%), cuscinetti e boccole, ruote ad ingranaggi e apparecchi idraulici sollecitati a forti pressioni (tenore Sn >14%).</p> <p>Per usi artistici, sin dal 1700 cominciano a essere usate leghe metalliche quaternarie ottenute addizionando al rame elementi alliganti come Sn, Zn e Pb (90% Cu, 10% alliganti). Dal 1900 sono stati introdotti largamente sul mercato i bronzi al silicio rimpiazzando la tradizionale lega quaternaria per le statue in bronzo 85-5-5-5 contenente il 5% di Sn, Pb e Zn. Oggi la maggior parte dei bronzi impiegati per usi industriali e artistici è una lega rame-silicio in virtù delle ottime proprietà di lavorabilità a caldo e freddo e, soprattutto, per le eccellenti proprietà anticorrosive.</p> |
| Morfologia | <p>Lega eutettica (a cristalli separati) la cui morfologia è caratterizzata dal processo di solidificazione: il rame puro sottoposto a raffreddamento estremamente lento (condizioni all'equilibrio) può solidificare in una struttura a grani esagonali in cui i grani sono orientati casualmente e hanno tutti approssimativamente le stesse dimensioni; questo tipo di struttura è ideale e alle normali velocità di raffreddamento (condizioni di non equilibrio) non si ottiene, la struttura che si genera, invece, comune per la maggior parte delle leghe, è una struttura dendritica in cui i cristalli sviluppano una specie di scheletro arboreo costituito da rami principali da cui si dipartono altri rami. Durante il raffreddamento le singole dendriti si accrescono e nel contempo riempiono gli spazi tra di esse finché tale accrescimento è impedito dalla vicinanza di altre dendriti: si ha così la completa</p> |

| | |
|---------------------------|---|
| | <p>solidificazione dell'intero cristallo.</p> <p>La rapida velocità di raffreddamento e l'impossibilità di operare secondo le condizioni di equilibrio generano un sottoraffreddamento che fa sì che il liquido antistante l'interfaccia di solidificazione si raffreddi in misura maggiore di quanto previsto dall'equilibrio; si crea quindi un gradiente termico all'interfaccia solido-liquido che porta ad una rapida crescita dei cristalli con morfologia dendritica lungo la direzione di estrazione del calore.</p> |
| <p>Descrizione</p> | <p>Comunemente con il termine bronzo si indica una lega di rame e stagno con rapporto in peso 90-80/10-20 anche se la composizione può variare notevolmente.</p> <p>Alla vista un bronzo appena sottoposto a pulizia meccanica si presenta di colore rosa-salmone; tuttavia comunemente si trova di colore nero-verdastro a seguito di fenomeni superficiali ossidativi che dipendono da diversi fattori tra cui le condizioni di esposizione all'ambiente (clima, posizione, livelli di inquinamento) ed eventuali trattamenti manutentivi e protettivi della superficie.</p> |
| <p>Componenti</p> | <p>Rame (componente principale) e alliganti:</p> <ul style="list-style-type: none"> • stagno (fino al 30%): migliora notevolmente le proprietà del rame aumentandone la durezza, le proprietà elastiche, la resistenza all'usura e la resistenza alla corrosione; essendo inoltre più basso fondente del rame, lo stagno riduce la temperatura di fusione della lega e ne facilita la colabilità; • piombo (fino al 40% al IV sec. d.C., oggi fino al 5%): migliora la colabilità e la lavorabilità della lega alle macchine utensili in virtù della sua insolubilità nella matrice di Cu, ma peggiora le proprietà meccaniche resistenziali. In % elevate (> 30%) è impiegato nelle leghe Cu-Sn antifrizione per la produzione di cuscinetti; • zinco (ottone): migliora la tenacità e la colabilità e al contempo svolge un ruolo da disossidante in virtù della sua alta affinità per l'ossigeno; • alluminio: aumenta la resistenza meccanica, la durezza e la resistenza alla corrosione, migliora la fluidità della lega ma la sua solubilità nel rame è limitata; • nicel: migliora notevolmente le proprietà meccaniche (durezza e carico di rottura) e la resistenza al <i>creep</i> e fornisce ottima resistenza alla corrosione; |

| | |
|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • berillio: aumenta fortemente le proprietà meccaniche per la formazione di un precipitato interdendritico; • silicio: migliora la lavorazione a freddo, fornisce grande fluidità alla lega di Cu e aumenta la resistenza alla corrosione, peggiora la conduttività elettrica; • manganese: aumenta la resistenza a caldo e a freddo e la resistenza alla corrosione (in acqua di mare e in presenza di vapore surriscaldato) • fosforo (fino allo 0,8%): aggiunto per migliorare la lavorabilità a freddo ma abbassa notevolmente la conduttività elettrica del rame. Ha anche ruolo disossidante. <p>La presenza e il tenore degli elementi aggiuntivi dipendono dalla funzione (artistica o industriale) della lega e dalle tecnologie in uso al tempo della fusione. Dal XX sec. d.C. il silicio sostituisce lo stagno per le applicazioni industriali.</p> |
|--|--|

Fenomenologia generale del degrado

La corrosione delle superfici metalliche ricoperte di uno strato acquoso neutro, è il processo in cui il metallo si ossida rilasciando nella soluzione ioni metallici e l'ossigeno, disciolto nello strato acquoso, si riduce a ioni OH⁻. Con l'evaporazione dello strato acquoso, precipitano idrossidi o ossidi metallici e si forma di una patina di diversi composti di corrosione.

In presenza di ambienti fortemente inquinati il fenomeno della corrosione viene accelerato e diventa più complesso. Tra tutti gli inquinanti, gli ossidi SO_x ed NO_x hanno un effetto importante reagendo con l'umidità atmosferica e formando i relativi acidi forti che abbassano molto il pH delle deposizioni umide.

La natura dello strato dei prodotti di corrosione ha un'importanza fondamentale perché a seconda che siano lisci e compatti o porosi determinano rispettivamente la protettività (*patina nobile*) o la non protettività del substrato metallico rispetto ad ulteriori fenomeni corrosivi. In generale, la patina di un bronzo esposta all'atmosfera può essere descritta come costituita da almeno tre strati:

- strato interno, a contatto con il substrato metallico, costituito da cuprite e ossidi di Sn amorfi (ed eventualmente cloruri);
- strato intermedio di colore verde costituito da sali di Cu e composti di Pb;
- strato esterno più scuro e più o meno spesso, per deposizione di ossidi e particolato atmosferico.

In ambiente urbano, dove nell'atmosfera prevalgono gas e aerosol a base di zolfo e dove non c'è una significativa presenza di cloruri, i prodotti di corrosione che si formano sono principalmente i solfati basici di rame. In generale, a partire dalla cuprite, si forma un solfato di rame amorfo che, successivamente si trasforma in diversi solfati cristallini a seconda delle diverse concentrazioni di inquinanti atmosferici presenti e delle condizioni di esposizione. In alcuni casi specifici si può osservare la formazione di antlerite, composto del rame che si ha quando nello strato acquoso il pH è inferiore a 3,5 e quando si raggiungono elevate concentrazioni di ione rame e ioni solfato. Tipicamente queste condizioni si raggiungono laddove il velo di umidità ristagna per lungo tempo sulle superfici metalliche.

In ambienti marini o in ambienti urbani e industriali con alta concentrazione di Cl⁻ si osserva la formazione degli idrossi-cloruri di rame, tipicamente atacamite, a partire dal precursore nantokite.

Oltre ai solfati e ai cloruri di rame, numerosi altri minerali vengono rilevati seppur in minore quantità, tra i quali sono da menzionare la tenorite, la gerhardite e la malachite. Inoltre, vengono rilevati, sempre in piccole quantità, composti organici come formiati e acetati di rame; infatti, gli acidi organici presenti nell'atmosfera sembra abbiano un ruolo complessante all'interno del fenomeno della corrosione atmosferica dei manufatti metallici.

Gli elementi di lega comunemente presenti nei bronzi quaternari esposti all'aperto (Sn, Zn e Pb) hanno un ruolo specifico nel fenomeno corrosivo, determinando la morfologia e la composizione tipica della patina del bronzo. Tra questi, lo stagno sembra essere determinante nella formazione della patina, grazie alla formazione di prodotti insolubili che si accumulano nella zona superficiale. Tra i molteplici parametri che influenzano la formazione della patina, uno dei principali è la geometria delle superfici: l'esposizione alla pioggia battente porta al processo elettrochimico della corrosione e al dilavamento (sia chimico che meccanico) con conseguente decuprificazione (catalizzazione degli ioni rame da parte degli ioni idrogeno), mentre le superfici più riparate e soggette a ristagni d'acqua sono caratterizzate dall'accumulo di composti di corrosione.

Nei bronzi dorati il fenomeno di corrosione del bronzo è amplificato dal contatto galvanico rame-oro. Essendo lo strato d'oro poroso e discontinuo, esso lascia penetrare le deposizioni umide formando prodotti di corrosione all'interfaccia bronzo-oro. La progressiva destabilizzazione della patina all'interfaccia riduce la stabilità dello strato d'oro, dando luogo a fenomeni di sollevamento (*blistering*) e distacco.

Principali fattori di degrado

Fattori interni di degrado

- difetti (cavità o cricche da ritiro, porosità da gas, micro-segregazione dovuta ad una solidificazione di non equilibrio, falle di fusione, soffiature...);
- deformazioni senza ricottura (trattamenti a freddo);
- tempi di ricottura troppo lunghi;
- stress meccanici causati dall'accoppiamento del bronzo con altri materiali (es. strutture interne in ferro)

Fattori esterni (ambientali) di degrado

- sbalzi termici che permettono il verificarsi degli stress meccanici di cui sopra;
- precipitazioni e umidità atmosferica;
- aerosol marino ricco di cloruri;

| | |
|---------------------------------------|---|
| | <p>- deposizione di ossidi SO_x e NO_x e particolato atmosferico (quarzo, gesso, ossidi metallici, composti organici...);</p> <p>- piogge acide.</p> |
| Principali fenomeni di degrado | |
| Corrosione atmosferica | <p>Fasi della corrosione:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ossidazione con formazione di un fil bruno-nerastro (principalmente cuprite) la cui composizione dipende dal tipo e dalla concentrazione degli inquinanti nell'atmosfera e dal tempo di "bagnamento" della superficie. • Conversione degli ossidi in sali in presenza del film acquoso sulla superficie metallica: gli ioni Cu⁺ della cuprite vengono ulteriormente ossidati a Cu₂⁺, ad opera dell'ossigeno disciolto mentre l'SO₂ atmosferico, assorbito nelle deposizioni umide, viene ossidato a solfato. Con la precipitazione dei solfati basici di rame, a seconda del pH dello strato acquoso, si forma brochantite o antlerite. • Lisciviazione dei prodotti di corrosione (<i>run-off</i>) : composti di rame, presenti in frazione maggiore nella patina, composti solubili dello zinco e quelli poco solubili del Pb. Al contrario lo Sn, formando ossidi insolubili è meno soggetto al fenomeno del dilavamento; sebbene gli ossidi di stagno non formino uno strato continuo, mostrano un'azione passivante e sono in grado di rallentare la lisciviazione. • Formazione della patina blu-verde dovuta ai composti di corrosione del rame, sostanze organiche o carboniose di origine biologica o derivanti da precedenti trattamenti di conservazione o pulitura. |
| Pitting | <p>Corrosione localizzata causata dalla precipitazione di cloruri negli strati più interni della patina durante la fase 2 della corrosione atmosferica: la conversione degli ossidi in sali.</p> |
| Micro-blistering | <p>Degrado che riguarda i bronzi dorati, con perdita di aderenza dello strato aureo attraverso la formazione di bolle: all'interfaccia bronzo-Au, grazie alla porosità dello strato di doratura, si forma un primo livello di prodotti di corrosione (ossidi), che subiscono trasformazioni in composti meno stabili a causa degli agenti aggressivi presenti in atmosfera (solfati, nitrati e cloruri). I sali di rame così formati generalmente possiedono un volume relativo maggiore rispetto a quello della semplice lega e provocano lo stato di tensione della doratura.</p> |

| Dose-risposta | |
|---|---|
| <p>Kucera (2004)</p> | <p>Bronze: Cu Sn6Pb7Zn5, ISO/R 1338 (Cu 81%, Sn 5.8%, Pb 6.7%, Zn 4.5%, Ni 1.6% + trace elements)</p> $ML = 0.026[SO_2]^{0.44} Rh \cdot \exp\{f(T)\} t^{0.86} + 0.029 Rain [H^+] t^{0.76} + 0.00043 Rain [Cl] t^{0.76}$ $f(T) = 0.060(T-11) \text{ when } T \leq 11^\circ C, \text{ otherwise } -0.067(T-11)$ <p>r^2 0.81 N 144</p> <p>ML = mass loss, $g m^{-2}$</p> <p>t = exposure time, years</p> <p>Rh = relative humidity, % - annual average</p> <p>T = temperature, $^\circ C$ - annual average</p> <p>$[SO_2]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average</p> <p>$[H^+]$ = concentration, $mg l^{-1}$ - annual average</p> <p>$[Cl]$ = concentration, $mg l^{-1}$ - annual average</p> <p>r^2 = coefficiente di correlazione</p> <p>N = numero di siti coinvolti nell'analisi</p> |
| <p>Vladimir Kucera & Johan Tidblad & Katerina Kreislova & Dagmar Knotkova & Markus Faller & Daniel Reiss & Rolf Sneathlage & Tim Yates & Jan Henriksen & Manfred Schreiner & Michael Melcher & Martin Fern & Roger-Alexandre Lefèvre & Joanna Kobus (2007)</p> | $ML = 1.33 + t (0.00876 [SO_2] e^{f(T)} Rh_{60} + 0.0409 Rain [H^+] + 0.038 PM_{10})$ <p>ML = mass loss, $g m^{-2}$</p> <p>t = exposure time, years</p> <p>Rh_{60} = relative humidity, % - annual average; = (Rh - 60) when Rh > 60; otherwise 0</p> <p>T = temperature, $^\circ C$ - annual average</p> <p>$[SO_2]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average</p> <p>$[H^+]$ = concentration, $mg l^{-1}$ - annual average</p> <p>$[Cl]$ = concentration, $mg l^{-1}$ - annual average</p> <p>PM10 PM concentration $\mu g m^{-3}$ (<10 μm)</p> <p>Rain Amount of precipitation $mm year^{-1}$</p> |
| <p>1) Pulitura</p> | <p>115009-41 Operazioni di pulitura meccanica in presenza di incrostazioni, croste di particolato atmosferico, patine di corrosione, residui di precedenti interventi.</p> |

| | |
|---|---|
| | 115042-55 Operazioni di pulitura chimica a tampone, impacco, immersione o con resine scambiatrici di ioni in presenza di incrostazioni, croste di particolato atmosferico, patine di corrosione, residui di precedenti interventi. |
| | 115056-60 Lavaggi e disidratazione per estrazione di sali solubili e tempestiva eliminazione dei residui d'acqua. |
| | [SPERIMENTALE] Pulitura a secco (<i>plasma etching</i>). (Progetto <i>TECLA</i>) |
| 2) Trattamenti inibitori di corrosione | 115061-63 Inibizione della corrosione mediante benzotriazolo, controllo in camera umida per verificarne l'efficacia e rimozione dei prodotti di corrosione formati |
| | [SPERIMENTALE] Applicazioni di rivestimenti in silano (3- mercapto-propil-trimetossisilano) PropS-SH arricchito con nanoparticelle di cerio (CeO₂) |
| | Trattamento all' ossalato di sodio (NaOx) . [Già applicato nel restauro del 2006 condotto dalla restauratrice Barbara Ferriani al Portale di Santa Maria delle Grazie a Milano] |
| | Lavaggio con acqua di calce (Ca (OH) ₂) a pH 10. [prima applicazione 2011-2002 sul 'Bronzo di Lussino', l'Apoxyomenos, nel restauro condotto da Giuliano Tordi, con la collaborazione dell'Opificio delle Pietre Dure di Firenze] |
| 3) Operazioni di consolidamento | 115064 Consolidamento con resine acriliche disciolte in solvente. |
| 4) Operazioni di protezione | 115098 Protezione superficiale con resine acriliche, anche addizionate di benzotriazolo o cere |
| | [SPERIMENTALE] Applicazione di rivestimenti con alcossisilani e composti simili del silicio. (Zucchi, 2007) |
| | [SPERIMENTALE] Deposizione a secco assistito da plasma (IPPA) da fase vapore di film sottili di ZnO e TiO ₂ . (Progetto <i>TECLA</i>) |
| Bibliografia | |
| <i>Acid rain attack on outdoor sculpture in perspective</i> , Richard A. Livingston, Atmospheric Environment 146 (2016) p. 332-345 | |
| <i>Impacts of air pollution on cultural heritage corrosion at European level: What has been achieved and what are the future scenarios</i> , F. Di Turo, C. Proietti, A. Screpanti, M. F. Fornasier, I. Cionni, G. Favero, A. De Marco, Environmental Pollution 188 (2016) p. 586-594 | |

Interventi di conservazione dei bronzi in ambiente urbano - Tecniche innovative di inibizione della corrosione, M. Matteini, Scienza e Beni culturali XXXI. 2015, Bressanone, Atti del convegno

Effects of Air Pollution on Materials and Cultural Heritage, Hindawi Publishing Corporation, International Journal of Corrosion, Volume 2012, Article ID 496321

E. Bernardi, C. Chiavari, B. Lenza, C. Martini, L. Morselli, F. Ospitali, L. Robbiola, *The atmospheric corrosion of quaternary bronzes: the leaching action of acid rain*, Corrosion Science 51 (2009) 159-170

L. Robbiola, K. Rahmouni, C. Chiavari, C. Martini, D. Prandstraller, A. Texier, H. Takenouti, P. Vermaut, New insight into the nature and properties of pale green surfaces of outdoor bronze monuments, Appl. Phys. A 92 (2008) 161-169

F. Zucchi, A. Frignani, V. Grassi, G. Trabanelli, M. DalColle, The formation of a protective layer of 3-mercaptopropyl-trimethoxysilane on copper, Corrosion Science 49 (2007) 1570-1583.

F. Zucchi, V. Grassi, A. Frignani, G. Trabanelli, C. Monticelli, Octadecyl-trimethoxy-silane film formed on copper in different conditions, Materials Chemistry and Physics 103 (2007) 340-344.

C. Chiavari, A. Colledan, A. Frignani, G. Brunoro, *Corrosion evaluation of traditional and new bronzes for artistic casting*, Materials Chemistry and Physics 95 (2006) 252-259.

International Co-operative Programme on Effects on Materials, including Historic and Cultural Monuments UNECE, 2004, a cura di V.Kucera (ICP Materials Coordination Centre, Sweden)

P. Letardi, I Trentin, G Cutugno (a cura di), *Monumenti in bronzo all'aperto. Esperienze di conservazione a confronto*, workshop Genova 2-4 dicembre 2004

G. P. Bernardini, M. C. Squarzialupi, R. Trosti-Ferroni, M. Matteini, C. G. Lalli, G. Lanterna, M. Rizzi, I. Tosini, The bronze doors of the baptistry in Florence: a comparative study of the bronze alloys and alteration products, Protection and Conservation of the Cultural Heritage of the Mediterranean Cities (2002) 43-47

C. Quaglierini, L. Amorosi, *Chimica e tecnologia dei materiali per l'arte*, Bologna 1991

L. Robbiola, L. P. Hurtel, Nouvelle contribution à l'étude des mécanismes de corrosion des bronzes de plein air: caractérisation de l'altération de bronzes de Rodin, Mémoires et études scientifiques revue de métallurgie (1991) 809-824

E. Mello, *The Gilding of Lorenzo Ghiberti's 'Doors of Paradise'*, Gold Bulletin 19 (4) (1986) 123-126

Tesi di laurea: Corso di Laurea Magistrale in Chimica Industriale, *Bronzi e bronzi dorati esposti all'azione della pioggia: corrosione ed inibizione*, Università di Bologna anno accademico 2011/2012, candidata: Serena Bassini

Sitografia: TECLA - NanoTecnologie e nanomateriali per i beni Culturali www.enrstandards.org/it/proj_tecla

[Prezzario](#): Restauro dei beni artistici ARI, DEI 2016

| Caratteristiche del materiale | |
|--|--|
| Tipologia/Composizione | Elemento chimico con simbolo Pb, di elevato peso specifico (11,3) e colore grigio-blu. È presente in natura in numerosi minerali quali la cerussite, l'anglesite e, principalmente, la galena. |
| Impiego | <p>Viene usato nella fabbricazione di munizioni, per la produzione di piastre per accumulatori, per contenitori deformabili, per il rivestimento di cavi elettrici e per lamiere, nell'industria chimica, in quella vetraria e ceramica, per pigmenti e vernici, nella preparazione di leghe di varia utilizzazione, e, grazie alla sua impermeabilità ai raggi X, trova impiego in radiologia e in impianti atomici.</p> <p>Fu scoperto in epoca molto antica: citato in documenti egizi del 1500 a.C. e nel libro dell'Esodo probabilmente perché i suoi minerali sono diffusi ovunque e sono facili da fondere, nonché perché il piombo stesso è un materiale facile da lavorare. Impiegato anche per produrre pigmenti.</p> <p>È molto resistente alla corrosione: tubazioni e strutture di piombo risalenti all'impero romano sono ancora esistenti ed in servizio oggi.</p> <p>Era largamente usato grazie alla sua lavorabilità e ancora oggi esistono grandiosi esempi di coperture fatte con questo metallo; è però svantaggiato negli spessori rilevanti (necessita di ossature più robuste del tetto) e nella forte dilatazione. Ha basso punto di fusione, fatto da tenere in considerazione in caso di incendio (Es. incendio della copertura del Duomo di Siena nel 1890).</p> <p>Il piombo resta ad oggi uno degli inquinanti ambientali più pericolosi e risulta tossico per l'essere umano anche a livelli bassi. Il suo impiego, se da un lato ha consentito un forte sviluppo tecnologico che ha aumentato il benessere della società moderna, dall'altro ha provocato una marcata contaminazione ambientale la cui portata va molto al di là dell'inquinamento atmosferico, interessando tutti gli altri comparti ambientali come l'acqua, il suolo e la vegetazione.</p> <p>Negli ultimi decenni del '900 l'inquinamento da piombo è stato legato al suo uso come antidetonante nei carburanti. Si è quindi ridotto con la sua eliminazione dai carburanti.</p> |
| Descrizione | Di color bianco-azzurro, all'aria diventa rapidamente opaco per la formazione di ossidi e carbonati che lo proteggono da ulteriori ossidazioni. |
| Fenomenologia generale del degrado | |
| Nel caso delle vetrate piombate (vetrate artistiche), la patina biancastra (carbonato basico di Pb) che ricopre uniformemente il filo di piombo, dovuta a un fenomeno di ossidazione, tende a irrigidire il metallo impedendogli di | |

adattarsi alle naturali dilatazioni dei vetri e provocandone così la rottura. I fenomeni di ossidazione e corrosione dei profilati di piombo sono più evidenti se il pannello è esposto alle intemperie: si è osservato che i listelli di piombo risultano più morbidi e integri sul lato interno del pannello mentre all'esterno sono ruvidi e corrosi.

Lo stesso **carbonato basico di piombo** che si forma naturalmente sulla superficie del metallo, può essere ottenuto anche artificialmente per reazione con l'acido acetico per produrre il pigmento **biacca** – o bianco di piombo. Questo pigmento però reagisce in modo irreversibile con l'acido solfidrico, producendo solfuro di piombo, di colore nero, è quindi sensibile agli inquinanti solfurei. Il fenomeno è rilevabile soprattutto sulle pitture murali, dove manca la protezione del legante e l'umidità esalta l'azione delle sostanze inquinanti poiché, oltre a portarle in soluzione, fa da veicolo attraverso il quale queste vengono a contatto con l'opera.

Un altro pigmento ottenuto dal piombo è il minio, di colore rosso intenso, formato da un ossido misto di Pb(II) e Pb(IV). Anch'esso può alterarsi cromaticamente in grigio in modo irreversibile, per reazione con HNO₃. È inoltre solubile in HCl.

Le escursioni termiche, i fenomeni di corrosione e l'ossidazione generano invece un importante degrado e una serie di rotture sulle **coperture in piombo**, soprattutto in corrispondenza delle costolature e delle bullonature: è bene infatti utilizzare sistemi di fissaggio che non impediscano la dilatazione, perché è poco resistente agli stress di tipo meccanico.

In generale però questo metallo ha una forte **resistenza alla corrosione**: come già detto, se esposto all'aria, forma una patina protettiva d'ossidazione che può essere di carbonato di piombo o solfato di piombo che sono ancora più resistenti alla corrosione. Per questo motivo, quando è impiegato come materiale da costruzione (non per pigmenti), non ha necessità di essere protetto con vernici. Quando il piombo è esposto a elementi alcalini come calce e malta di cemento si forma un ossido di piombo rossastro. La reazione con il **diossido di carbonio** e gli acidi organici forma dei composti che consentono un'ulteriore corrosione del piombo ma questa è molto lenta.

È più sensibile ad alcuni acidi quali l'acetico e il nitrico e ad alcuni acidi derivati da sostanze vegetali, ma è resistente alla corrosione dell'acqua di mare.

Fattori di degrado

| | |
|--|--|
| Fattori interni di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - errori di progettazione o posa: stress meccanici eccessivi; - accoppiamento vincolante con materiali con dilatazione termica differente; - assenza di legante o protettivo (nel caso dei pigmenti). |
| Fattori esterni (ambientali) di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - SO_x, PM₁₀, NO_x, Cl⁻ per l'alterazione dei <u>pigmenti</u>; - CO₂; - grandine; - umidità e pioggia (per l'attivazione delle reazioni di corrosione; diversamente dall'umidità e dalla condensa, la pioggia consente un maggiore risciacquo dagli agenti inquinanti, che però non si può mai dire totale). |

Dose-risposta

Non sono state rinvenute in bibliografia relazioni dose-risposta per quanto concerne questo materiale

Interventi conservativi: principali operazioni manutentive

Benché l'alterazione cromatica dei pigmenti a base di piombo sia sempre stata considerata irreversibile, da pochi anni sono state eseguite delle riconversioni. Problematica fondamentale è la necessità di individuare una sostanza riducente compatibile con i componenti del dipinto e che lavori di un *range* di pH che non danneggi altri pigmenti. Nel dipinto *Il ratto delle sabine*, di Luca Cambiaso, sono stati impiegati acqua ossigenata come riducente e acido acetico glaciale: a seguito di processi naturali l'acetato di piombo, primo prodotto di reazione, si trasforma prima in acetato basico (per idrosili) e poi in carbonato basico (per carbonatazione) ossia nuovamente in bianco di piombo. Oltre alle limitazioni pratiche di questo trattamento, che può causare alterazioni secondarie anche gravi in altri dipinti, emerge un problema di tipo teorico, in quanto per molti l'alterazione deve essere accettata come un'irreversibile conseguenza

dell'invecchiamento del dipinto e come tale non deve essere fatto alcun intervento di riconversione.

Per quanto riguarda le falderie invece, quando queste sono deteriorate, si procede alla sostituzione delle parti intaccate dal degrado. In alcuni casi (specie per le coperture più ripide) si può procedere alla sostituzione di tutto il tetto con una lega di piombo-antimonio-stagno, che è più resistente ai fenomeni di creep e alla fatica. Se invece il danno è limitato a un'area ristretta, si può procedere con una vernice protettiva o mediante l'inserimento di fogli di rame.

La manutenzione del piombo non ha un prezzario di riferimento, ma si può fare fede a quanto riportato nella Scheda tecnica del rame, tenendo presente la differenza di costo dei due materiali.

Bibliografia

F. Licenziati, R. Falcone, E. F. Orsega, M. Verità, *Studio preliminare sulla produzione e il degradodi vetri potassici e sodici come modelli di vetrate artistichee di vetri industriali in ambiente confinato*, Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro, 2010, 3, pp. 7-17

O. Doria, «Gli affreschi di villa imperiale di Terralba a Genova. L'uso della biacca, suoi processi di deterioramento e applicazione delle metodologie di riconversione», in Atti del convegno scienza e Beni culturali, Bressanone 2005, pp. 1233-1240

M. Matteini, «Ossidazione della biacca in pitture murali. Metodi proposti per la riconversione del pigmento ossidato nelle pitture di A. Baldovinetti nella chiesa di S. Miniato a Firenze» in Atti del convegno sul restauro delle Opere d'Arte, Florence, 2-6 novembre 1976, pp.257-269

Sitografia: Minium Mineral Data, in webmineral.com

| Caratteristiche del materiale | |
|--------------------------------------|---|
| Tipologia | Metallo |
| Composizione | Elemento metallico privo di impurezze (al 99,99% se raffinato per via elettrolitica). Piccole tracce di impurezze di As, Sb e Fe ne riducono la conducibilità termica ed elettrica. Sono naturalmente presenti impurezze di Au, Ag e Pt che non si ossidano perché hanno potenziale di riduzione superiore a quella del Cu. |
| Impiego | Per le sue doti il rame è diffuso nell' impiantistica idrotermosanitaria (scambiatori di calore, nei pannelli solari e nei pannelli radianti a parete e a pavimento), nella rubinetteria, nelle attrezzature per la nautica, nell'elettrotecnica e nell'elettronica, in architettura (tetti e coperture, gronde , scossaline, pluviali ed altri elementi di lattoneria), nella monetazione, nell'artigianato e nell'oggettistica (piastre, cornici, medaglie e oggetti da arredamento), nei trasporti e in edilizia |
| Descrizione | <p>Il rame è un metallo rosato o rossastro, di conducibilità elettrica e termica elevatissima, superata solo da quelle dell'argento; è molto resistente alla corrosione (per via di una patina aderente che si forma spontaneamente sulla superficie, prima di colore bruno e poi di colore verde o verde-azzurro) e non è magnetico. È facilmente lavorabile, estremamente duttile e malleabile, ma non è idoneo a lavorazioni con asportazione di truciolo, perché ha una consistenza piuttosto pastosa; può essere facilmente riciclato e i suoi rottami hanno un alto valore di recupero; si combina con altri metalli a formare numerose leghe metalliche (si calcola che se ne usino almeno 400), le più comuni sono il bronzo e l'ottone, rispettivamente con lo stagno e lo zinco; tra le altre, anche i cupronichel e i cuprallumini (detti anche bronzi all'alluminio).</p> <p>Inoltre il rame è batteriostatico, cioè combatte la proliferazione dei batteri sulla sua superficie.</p> |
| Stati di ossidazione | <p>I due più comuni stati di ossidazione del rame sono +1 (ione <i>rameoso</i>, Cu⁺) e +2 (ione <i>rameico</i>, Cu²⁺). Due esempi sono il suo ossido di rame(I) (Cu₂O) ed ossido di rame(II) (CuO).</p> <p>Esistono inoltre due stati rari di ossidazione, +3 e +4 che formano ioni detti cuprati dove il rame(III) o il rame(IV) coordinano atomi più elettronegativi andando a formare ioni come [CuO₂]⁻ (dove il rame ha valenza +3), [CuF₆]²⁻ (Dove il rame ha valenza +4), i cui sali sono solitamente usati per magneti superconduttori (YBa₂Cu₂O₇) e sali complessi (Cs₂CuF₆), oltre a composti organometallici (R₂[Cu⁺³]⁻) osservabili all'interno di alcune proteine.</p> |
| Composti | Gli ossidi stabili del rame sono due, l'ossido di rame(II) (o ossido rameico) CuO e l'ossido di rame(I) (o ossido rameoso) Cu ₂ O. Gli ossidi di rame sono impiegati nella produzione dell'ossido misto di ittrio, bario e rame (YBa ₂ Cu ₃ O _{7-δ}), abbreviato in YBCO, che è la |

base di molti superconduttori non-convenzionali. Gli unici idrossidi del rame sono il $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ed il $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$.

I sali di rame(II) hanno un tipico colore verde-azzurro; la reazione con l'anidride carbonica atmosferica produce il carbonato di rame(II), responsabile della patina verde che copre i tetti e le superfici di rame esposte all'aria.

Tra gli altri composti si annovera il solfato di rame(II), noto anche come *verderame* ed usato come fungicida in viticoltura.

Fenomenologia generale del degrado

Il rame è poco reattivo: significa che può reagire con l'ambiente circostante, ma più lentamente della maggior parte degli altri metalli. Ha un potenziale elettrochimico superiore a 0 che convenzionalmente è quello della reazione di ossidoriduzione dell'idrogeno (H^+/H) e per questo non viene attaccato dagli acidi, tranne da quelli fortemente ossidanti.

Esposto all'aria e all'acqua, il rame si combina con l'ossigeno contenuto in esse e forma uno strato superficiale di ossido molto resistente. A differenza della ruggine del ferro, che è porosa e debole, questo composto del rame è resistente e ben ancorato al metallo sottostante, che quindi ne viene protetto: si tratta di una "corrosione positiva", chiamata **passivazione**. Il rame non si combina solo con l'ossigeno, ma anche con altri elementi contenuti nell'ambiente, dando luogo a composti dalla stechiometria variabile, che può cambiare da luogo a luogo: per esempio, in prossimità del mare, questi composti sono più ricchi di cloruri. Lo strato superficiale cambia anche nel corso del tempo e questo lo si osserva in architettura: un tetto di rame perde la sua brillantezza dopo qualche settimana e diventa sempre più scuro, a mano a mano che l'ossido si forma. Nel corso degli anni, quando il composto diventerà un sale composto anche da altri elementi, il suo colore tenderà al verde o verdeazzurro, una tonalità caratteristica di tanti sali di rame. Questa superficie protettiva di colore verde viene chiamata "*patina*" e non deve essere confusa con il *verderame*, che è un composto – solubile in acqua, quindi non durevole – usato in agricoltura.

Il primo passo nello sviluppo di una patina è l'ossidazione del rame a ossido di rame (I) – ossido rameoso, Cu_2O – che ha un colore rosso o rosa (*equazione 1*), che si forma inizialmente quando il metallo comincia a reagire con le molecole di ossigeno nell'aria.

L'ossido di rame (I) viene ulteriormente ossidato in ossido di rame (II) – ossido rameico, CuO – che è di colore nero (*equazione 2*).

Se l'aria contiene tracce di zolfo, dovuto ad esempio dalla combustione di combustibili fossili, si forma anche il solfuro di rame nero (CuS) (*equazione 3*).



Nel corso degli anni, CuO e CuS reagiscono lentamente con l'anidride carbonica (CO_2) e gli ioni idrossido (OH^-) dell'acqua, formando vari sali come $\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ (*equazione 4*), $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$ (*equazione 5*) e $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6$ (*equazione 6*), che costituiscono la patina.

L'umidità e la concentrazione degli elementi nell'aria (composti dello zolfo, cloruri, ecc.) e perfino l'orientamento della superficie in rame hanno un impatto significativo sulla velocità di sviluppo della patina, nonché sul rapporto relativo dei tre componenti.



| | |
|---|--|
| Per ulteriori dettagli sui processi di corrosione si fa riferimento alla Scheda tecnica del bronzo . | |
| Fattori di degrado | |
| Fattori interni di degrado | Presenza di impurità che causano la formazione di altri ossidi metallici. |
| Fattori esterni (ambientali) di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - agenti inquinanti (NO_x, SO₂, CO, O₃...), tra i quali O₃, H₂S e SO₂ costituiscono i principali fattori di corrosione, con conseguente formazione di solfuri e ossidi di rame particolarmente dannosi per gli impianti elettrici/elettronici; - umidità (per l'attivazione della corrosione): la massima corrosione è stata riscontrata con l'88% di UR a 16° C e la minima col 18% di UR a 2° C; - pH; - correnti galvaniche; - grandine. |
| Dose-risposta | |
| Christodoulakis, Tzanis, Varotsos, Ferm, Tidblad (2016) | $ML = 4.21 + 0.00201[SO_2]^{0.4}[O_3]Rh_{60}e^{f(T)} + 0.0878Rain[H^+]$ $f(T) = 0.059(T-10) \text{ when } T \leq 10^\circ C, \text{ otherwise } -0.036(T-10) \text{ when } T > 10^\circ C$ <p> <i>ML</i> = mass loss by corrosion, $g m^{-2}$ <i>[SO₂]</i> = annual average concentration, $\mu g m^{-3}$ <i>[O₃]</i> = annual average concentration, $\mu g m^{-3}$ <i>Rh</i> = annual average of relative humidity (%), <i>Rh₆₀</i> = <i>Rh</i> - 60 when <i>Rh</i> > 60, 0 otherwise <i>T</i> = annual average temperature, °C <i>Rain</i> = amount of precipitation, $\mu g m^{-3}$ <i>[H⁺]</i> = annual average concentration, $mg L^{-1}$ </p> |
| Brimblecombe, Grossi (2010) | <p><u>Funzione di perdita di massa in aree non riparate (Δm_t)</u></p> $\Delta m_t = 0.0027SO_{2(g)}^{0.32} O_{3(g)}^{0.79} RH \exp(f_{Cu})t^{0.78} + 0.05Rn[H^+]t^{0.89}$ <p><i>f_{Cu}</i> = 0.083(T-10) quando T < 10°C e -0.032(T-10) con T > 10°C</p> <p><u>Funzione di perdita di massa in aree riparate ($\Delta m'_t$)</u></p> $\Delta m'_t = 0.00045SO_{2(g)}^{0.28} O_{3(g)}^{1.16} RH \exp(f'_{Cu})t^{0.78}$ <p><i>f'_{Cu}</i> = 0.033(T-10) quando T < 10°C e -0.019(T-10) con T > 10°C.</p> <p><u>Funzione di MULTI-ASSESS</u></p> $\Delta m_t = 3.12 + (1.09 + 0.002SO_{2(g)}^{0.4} O_{3(g)} RH_{60} \exp(f_{Cu}) + 0.0878Rn[H^+]) t$ <p><i>RH₆₀</i> = <i>RH</i> - 60 con <i>RH</i> > 60</p> |
| Kucera (2004) | $ML = 0.0027[SO_2]^{0.32}[O_3]^{0.79}Rh \cdot \exp\{f(T)\}t^{0.78} + 0.050Rain\{H^+\}t^{0.89}$ |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|-----------------------|---|-------|-------------|---|------------------|-------------------------|------|-----------------------|---------------------------------------|------|--------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------|------------------------------|-------------------|----------------------|
| | <p>$f(T) = 0.083(T-10)$ when $T \leq 10^\circ\text{C}$, otherwise $-0.032(T-10)$</p> <p>r^2 0.73 N 95</p> <p>ML = mass loss, $g\ m^{-2}$</p> <p>t = exposure time, years</p> <p>Rh = relative humidity, % - annual average</p> <p>T = temperature, $^\circ\text{C}$ - annual average</p> <p>$[SO_2]$ = concentration, $\mu\text{g}\ m^{-3}$ - annual average</p> <p>$[O_3]$ = concentration, $\mu\text{g}\ m^{-3}$ - annual average</p> <p>r^2 = coefficiente di correlazione</p> <p>N = numero di siti coinvolti nell'analisi</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Vladimir Kucera & Johan Tidblad & Katerina Kreislova & Dagmar Knotkova & Markus Faller & Daniel Reiss & Rolf Snelthage & Tim Yates & Jan Henriksen & Manfred Schreiner & Michael Melcher & Martin Fern & Roger-Alexandre Lefèvre & Joanna Kobus</p> <p>(2007)</p> | <p>$ML = 3.12 + t (1.09 + 0.00201 [SO_2]^{0.4} [O_3] Rh_{60} e^{f(T)} + 0.0878 \text{ Rain [H+]})$</p> <p>$ML$ = mass loss, g/m^2</p> <table> <tr> <td>Time</td> <td>t</td> <td>years</td> </tr> <tr> <td>Temperature</td> <td>T</td> <td>$^\circ\text{C}$</td> </tr> </table> <p>Rh_{60} = relative humidity, % - annual average; = (Rh -60) when Rh>60; otherwise 0</p> <table> <tr> <td>Amount of precipitation</td> <td>Rain</td> <td>mm year^{-1}</td> </tr> <tr> <td>Acidity of precipitation_a</td> <td>[H+]</td> <td>mg l^{-1}</td> </tr> <tr> <td>SO₂ concentration</td> <td>[SO₂]</td> <td>$\mu\text{g m}^{-3}$</td> </tr> <tr> <td>O₃ concentration</td> <td>[O₃]</td> <td>$\mu\text{g m}^{-3}$</td> </tr> </table> | Time | t | years | Temperature | T | $^\circ\text{C}$ | Amount of precipitation | Rain | mm year^{-1} | Acidity of precipitation _a | [H+] | mg l^{-1} | SO ₂ concentration | [SO ₂] | $\mu\text{g m}^{-3}$ | O ₃ concentration | [O ₃] | $\mu\text{g m}^{-3}$ |
| Time | t | years | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Temperature | T | $^\circ\text{C}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Amount of precipitation | Rain | mm year^{-1} | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Acidity of precipitation _a | [H+] | mg l^{-1} | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SO ₂ concentration | [SO ₂] | $\mu\text{g m}^{-3}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| O ₃ concentration | [O ₃] | $\mu\text{g m}^{-3}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Interventi conservativi: principali operazioni manutentive | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Posa in opera | <p>02.P45.L45 Fornitura e posa in opera di staffa fermacoppi in rame, completa di chiodi in rame,</p> <p>02.P45.L70 Fornitura e posa in opera di lastra di rame di mm 8/10, per sottocoppo</p> <p>02.P45.L85 Fornitura e posa in opera di staffa fermalose in rame di sezione fino a 20x400x3 mm, completa di chiodi</p> <p>01.P13.F00.010 Canali di gronda e tubi pluviali in lamiera di rame, con tutte le lavorazioni occorrenti</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Revisione | <p>01.A19.C20 Ripassamento di faldali e converse comprese le occorrenti saldature e la coloritura con una ripresa di catramina.</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bibliografia | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>J. Christodoulakis, C. G. Tzani, C. A. Varotsos, M. Fern, J. Tidblad, <i>Impacts of air pollution and climate on materials in Athens, Greece</i>, Atmos. Chem. Phys. Discuss.196, 2016</p> <p>B. Valdez Salas, M. Schorr Wiener, R. Zlatev Koytchev..., <i>Copper Corrosion by Atmospheric Pollutants in the Electronics Industry</i>, Hindawi Publishing CorporationI SRN Corrosion, 2013</p> <p>P. Brimblecombe, C. M. Grossi, <i>Potential Damage to Modern Building Materials from 21st Century Air Pollution</i>, NOAA's ARK, 2010</p> <p><i>International Co-operative Programme on Effects on Materials, includig Historic and Cultural Monuments</i> UNECE, 2004, a cura di</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

V.Kucera (ICP Materials Coordination Centre, Sweden)

F. Borgese, *Gli elementi della tavola periodica. Rinvenimento, proprietà, usi. Prontuario chimico, fisico, geologico*, Roma, CISU, 1993

C. Quaglierini, L. Amorosi, *Chimica e tecnologia dei materiali per l'arte*, Bologna 1991

Sitografia: Istituto Europeo del Rame copperalliance.it

[Prezzario](#): Prezzario Regione Piemonte 2018 nelle sezioni 2) Recupero edilizio e 1) Opere edili.

| <i>Caratteristiche del materiale</i> | |
|---|--|
| Tipologia | Metallo |
| Composizione | Elemento chimico di simbolo Zn; è un metallo di colore bianco-azzurro che all'aria si copre di un sottile strato protettivo di carbonato basico. |
| Impiego | <p>È usato soprattutto in operazioni di zincatura e come componente essenziale di numerose leghe: è un'opzione eccellente per la protezione anticorrosione dell'acciaio al carbonio. Sono disponibili alcuni processi idonei per l'applicazione di rivestimenti allo zinco su parti in acciaio, da piccole viti a canaline di alcuni metri di lunghezza.</p> <p>Tra i numerosi composti dello zinco, l'ossido, il carbonato, il cromato, il cloruro, il solfato, il solfuro e l'acetato sono utilizzati in tanti campi: l'industria delle vernici, l'industria della gomma, della ceramica, dei vetri, delle fibre sintetiche, in medicina, in cosmetica, etc.</p> <p>Leghe di zinco sono state usate per secoli: l'ottone è senza dubbio la più antica, e si ritrovano manufatti in tale lega a partire dal primo millennio a.C..</p> <p>Attualmente lo zinco è uno dei metalli più comuni nell'uso tecnologico dopo ferro, alluminio e rame.</p> <p>I laminati di zinco, in particolare, vengono utilizzati per la copertura di siti particolarmente esposti agli agenti atmosferici, per coperture in generale, lattonerie, rivestimenti di facciata, ecc.. Al livello europeo, rivestono un ruolo importante: la loro lunga tradizione nell'edilizia lo hanno reso uno dei materiali non ferrosi più utilizzati per rivestimenti e coperture.</p> |
| Descrizione | <p>La sua facilità di lavorazione gli permette di adattarsi facilmente a qualsiasi tipo di curva, superficie o linea rispondendo perfettamente ai canoni dell'architettura moderna.</p> <p>Tra le diverse ottime qualità di questo materiale c'è senza dubbio il perfetto connubio tra qualità e prezzo, inoltre le sue particolari proprietà chimico-fisiche lo rendono un prodotto facilmente utilizzabile e malleabile.</p> |
| <i>Fenomenologia generale del degrado</i> | |
| <p>Il tasso di corrosione dello zinco è oltre dieci volte inferiore a quello dell'acciaio, con circa 0,5 µm/a in atmosfere rurali/urbane e arrivando a circa 5 µm/a in ambienti costieri.</p> <p>Questa caratteristica è il risultato della formazione di strati stabili di prodotti di corrosione contenenti carbonati (dalla CO₂ nell'aria) e cloruri (se presenti nell'atmosfera). Le condizioni in cui la formazione di tali prodotti da corrosione insolubili non è possibile, provocano tassi di corrosione eccessivamente elevati e quindi limitano l'idoneità dello zinco come rivestimento protettivo. Tra queste figurano condizioni di umidità permanente o l'esposizione a forti concentrazioni di inquinanti industriali come il diossido di zolfo. In tali ambienti si formano prevalentemente prodotti di corrosione solubili, che possono essere lavati via dalla pioggia.</p> <p>Oltre alla riduzione dei tassi di corrosione, lo zinco fornisce una protezione catodica o sacrificale all'acciaio</p> | |

sottostante. Laddove graffi, scheggiature o altri danni al rivestimento di zinco scoprono l'acciaio, si verifica una forma particolare di **corrosione galvanica preferenziale**: lo zinco, essendo un metallo meno nobile dell'acciaio, si corrode preferenzialmente, aiutando quindi a mantenere protetta la superficie esposta dell'acciaio.

La zincatura si consuma in modo piuttosto omogeneo durante la corrosione atmosferica, di conseguenza, raddoppiando lo spessore del rivestimento in zinco di norma si raddoppia anche il tempo in cui si consuma e si forma la ruggine sul substrato di acciaio.

Fattori di degrado

Fattori esterni (ambientali) di degrado

- SO_x, NO_x;
- umidità permanente, rugiada o pioggia battente;
- temperatura;
- pH.

Dose-risposta

Brimblecombe, Grossi (2010)

Funzione di perdita di massa in aree non riparate (Δm_t)

$$\Delta m_t = 1.35SO_{2(g)}^{0.22} \exp(0.01RH + f_{Zn})t^{0.85} + 0.029Rn[H^+]t^{0.89}$$

$$f_{Zn} = 0.062(T-10) \text{ quando } T < 10^\circ\text{C} \text{ e } -0.021(T-10) \text{ con } T > 10^\circ\text{C}$$

Funzione di perdita di massa in aree riparate ($\Delta m'_t$)

$$\Delta m'_t = 0.058SO_{2(g)}^{0.16} RH \exp(f'_{Zn})t^{0.49}$$

$$f'_{Zn} = 0.039(T-10) \text{ quando } T < 10^\circ\text{C} \text{ e } -0.034(T-10) \text{ con } T > 10^\circ\text{C}.$$

Funzione di MULTI-ASSESS

$$\Delta m_t = 1.82 + (1.71 + 0.471SO_{2(g)}^{0.22} \exp(0.018RH) \exp(f_{Zn}) + 0.041Rn[H^+] + 1.37HNO_{3(g)})t$$

Kucera (2004)

$$ML = 1.4[SO_2]^{0.22} \exp\{0.018Rh + f(T)\}t^{0.85} + 0.029Rain[H^+]t$$

$$f(T) = 0.062(T-10) \text{ when } T \leq 10^\circ\text{C}, \text{ otherwise } -0.021(T-10)$$

$$r^2 = 0.84 \quad N = 98$$

ML = mass loss, $g m^{-2}$

t = exposure time, years

Rh = relative humidity, % - annual average

T = temperature, °C - annual average

$Rain$ = amount of precipitation, $m year^{-1}$ - annual average

$[H^+]$ = concentration, $mg l^{-1}$ - annual average

$[SO_2]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average

r^2 = coefficiente di correlazione

N = numero di siti coinvolti nell'analisi

Warkiss, Eyre, Holland, Rabl, Short (2000)

Zinco e acciaio galvanizzato non riparati

ICP - unsheltered zinc (4 years):

$$ML = 14.5 + 0.043.TOW.SO_2.O_3 + 0.08.H^+$$

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|-------------------------------|---|-------|-------------|---|----|-------------------|----|---|-------------------------|------|-----------------------|---------------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|----------------|--------------------------------|---------------------|----------------|------------------|------------------|-------------------------------|
| | <p><u>Zinco riparato</u></p> <p>ICP - sheltered zinc (4 years):</p> $ML = 5.5 + 0.013.TOW.SO_2.O_3$ <p><i>ML</i> = mass loss, g/m^2 after 4 years</p> <p><i>TOW</i> = fraction of time relative humidity exceeds 80% and temperature $>0^\circ C$</p> <p><i>SO₂</i> = sulphur dioxide concentration, $\mu g/m^3$</p> <p><i>O₃</i> = ozone concentration, $\mu g/m^3$</p> <p><i>H⁺</i> = acidity, $meq/m^2/year$</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Haynie, Upham (1970)</p> | <p><i>Zinc - corrosion = 0,001028 (RH-48,8) SO₂</i></p> <p>dove <i>RH</i> è l'umidità relativa e <i>SO₂</i> è la quantità di <i>SO₂</i> espressa in $\mu g/m^3$ e la corrosione/erosione è espressa in μm</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>Vladimir Kucera & Johan Tidblad & Katerina Kreislova & Dagmar Knotkova & Markus Faller & Daniel Reiss & Rolf Snethlage & Tim Yates & Jan Henriksen & Manfred Schreiner & Michael Melcher & Martin Ferm & Roger-Alexandre Lefèvre & Joanna Kobus (2007)</p> | <p>$ML = 1.82 + t (1.71 + 0.471 SO_2^{0.22} e^{0.018RH} e^{t(T)}) + 0.041 \text{ Rain } [H^+] + 1.37 [HNO_3]$</p> <p><i>ML</i> = mass loss, g/m^2</p> <table border="0"> <tr> <td>Time</td> <td>t</td> <td>years</td> </tr> <tr> <td>Temperature</td> <td>T</td> <td>°C</td> </tr> <tr> <td>Relative humidity</td> <td>Rh</td> <td>%</td> </tr> <tr> <td>Amount of precipitation</td> <td>Rain</td> <td>mm year⁻¹</td> </tr> <tr> <td>Acidity of precipitation_a</td> <td>[H⁺]</td> <td>mg l⁻¹</td> </tr> <tr> <td>SO₂ concentration</td> <td>[SO₂]</td> <td>$\mu g m^{-3}$</td> </tr> <tr> <td>HNO₃ concentration</td> <td>[HNO₃]</td> <td>$\mu g m^{-3}$</td> </tr> <tr> <td>PM concentration</td> <td>PM₁₀</td> <td>$\mu g m^{-3}$ (<10 μm)</td> </tr> </table> | Time | t | years | Temperature | T | °C | Relative humidity | Rh | % | Amount of precipitation | Rain | mm year ⁻¹ | Acidity of precipitation _a | [H ⁺] | mg l ⁻¹ | SO ₂ concentration | [SO ₂] | $\mu g m^{-3}$ | HNO ₃ concentration | [HNO ₃] | $\mu g m^{-3}$ | PM concentration | PM ₁₀ | $\mu g m^{-3}$ (<10 μm) |
| Time | t | years | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Temperature | T | °C | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Relative humidity | Rh | % | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Amount of precipitation | Rain | mm year ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Acidity of precipitation _a | [H ⁺] | mg l ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| SO ₂ concentration | [SO ₂] | $\mu g m^{-3}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| HNO ₃ concentration | [HNO ₃] | $\mu g m^{-3}$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| PM concentration | PM ₁₀ | $\mu g m^{-3}$ (<10 μm) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p><i>Interventi conservativi: principali operazioni manutentive</i></p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p>La manutenzione dello zinco non ha un prezario di riferimento, ma i costi di manutenzione sono notevolmente ridotti, se non addirittura assenti, grazie alla longevità del prodotto e alla resistenza alla corrosione. Bisogna inoltre tener presente che la formazione di patine di ossidazione insolubili sulla superficie aumentano la resistenza alla corrosione del metallo e pertanto devono essere conservate.</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p><i>Bibliografia</i></p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <p><i>International Co-operative Programme on Effects on Materials, including Historic and Cultural Monuments</i> UNECE, 2004, a cura di V.Kucera (ICP Materials Coordination Centre, Sweden)</p> <p>M. Gayle, D. W. Look, J. G. Waite, <i>Metals in America's Historic Buildings - Uses and Preservation Treatments</i>, Washington D.C., 1992</p> <p>Ben-chieh Liu, Eden Siu-hung Yu, <i>Physical and economic damage functions for air pollutants by receptor</i>, Kansas City, 1976</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Caratteristiche del materiale | |
|---|--|
| Tipologia | Materiale lapideo naturale |
| Composizione | <p>Trattandosi di rocce, quindi di un miscuglio di minerali, non hanno una composizione definita da una formula chimica.</p> <p>I clasti possono avere svariata natura anche nella stessa roccia, mentre <u>in questa scheda si fa riferimento principalmente a litotipi a cemento carbonatico (calcite)</u>, che sono i più comuni e utilizzati come pietra da opera.</p> |
| Impiego | Utilizzate come materiali da costruzione in genere allo stato grezzo, semilavorato in blocchi o conci per la realizzazione di murature e rivestimenti . Talora vengono lucidate (p.e. conglomerati e brecce varicolori), rientrano commercialmente nella categoria dei “marmi” e vengono utilizzate per rivestimenti e pavimenti . |
| Morfologia | Rocce sedimentarie clastiche derivate dalla cementazione di sabbie (arenarie), ghiaie (conglomerati) o detrito (clasti spigolosi: brecce). Le rocce di questo tipo hanno in genere tessitura massiccia o grossolanamente stratificata in bancate da decimetriche a metriche. |
| Descrizione | <p>Le arenarie hanno struttura granulare medio-fine. Il colore è vario, in genere grigio-beige, ma talora rossastro o verdino.</p> <p>I conglomerati e le brecce hanno struttura granulare grossolana, con clasti di taglia millimetrica-centimetrica da arrotondati (conglomerati, puddinghe) e spigolosi (brecce). Il colore è spesso vario all'interno della roccia (varicolori).</p> |
| Componenti | Si tratta di rocce i cui clasti possono avere natura molto varia. Il cemento è spesso calcareo-argilloso-micaceo (p.e. “puddinga della Dora”, “ceppo lombardo”, “pietra serena”, “Macigno”, “pietra forte”), meno frequentemente siliceo (p.e. “arenarie della Val Gardena”). |
| Principali caratteristiche prestazionali | <p>Le caratteristiche prestazionali sono molto varie, in relazione principalmente al grado di cementazione e alla porosità della roccia.</p> <p>Peso di volume: 20-26 kN/mc</p> <p>Carico di rottura compressione semplice: 50.000-120.000 kN/mq</p> |

| | |
|--|---|
| | (500-1200 kg/cm ² - massimo per quarziti) Coeff. dilatazione termica: 0,011-0,012 mm/m °C Coeff. Imbibizione: 5-25 % |
| Fenomenologia generale del degrado | |
| <p>Il degrado delle arenarie e dei conglomerati è legato sia a fenomeni fisici che chimici, per questi ultimi con processi assimilabili a quelli delle rocce calcaree o silicee a seconda del tipo di cemento (vedi schede rocce calcaree e granitoidi). Poiché la porosità è spesso elevata, i processi possono attaccare la roccia in profondità, dando luogo a importanti fenomeni di degrado.</p> <p>I fenomeni fisici legati agli sbalzi termici (termoclastismo) e ai fenomeni di gelo-disgelo (crioclastismo) risultano quindi particolarmente attivi. Si verificano fenomeni di scagliatura e esfoliazione della superficie della roccia e di decoesione e sfarinamento con distacco dei singoli clasti.</p> <p>Nel caso delle puddinghe (p.e. puddinga della Dora), la grossa dimensione dei clasti e la natura molto varia, con reazione diversa agli sbalzi termici, favorisce il degrado delle superfici maggiormente esposte (esposizione sud), con distacco dei singoli clasti ma anche di placche di spessore 1-2 cm.</p> <p>La colonizzazione biologica è un'importante e duplice fattore di degrado: se da una parte può inficiare sull'estetica delle superfici (licheni incrostanti, alghe terrestri, batteri...), dall'altra può costituire causa di forti stress meccanici al materiale lapideo (radici di piante superiori) o anche solo alla superficie (muschi, licheni endolitici come ad es. <i>Verrucaria</i>, piante rampicanti...).</p> | |
| Fattori di degrado | |
| Fattori interni di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - elevata porosità; - differenze di proprietà fra clasti e cemento. |
| Fattori esterni (ambientali) di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - risalita capillare; - dilavamento; - cicli di gelo-disgelo; - cristallizzazione salina; - precipitazioni e umidità atmosferica; - aerosol; - deposizione di ossidi SO_x e NO_x e particolato atmosferico (quarzo, gesso, ossidi metallici, composti organici...); - piogge acide; - correnti eoliche; - stress meccanici; - colonizzazione biologica. |

Dose-risposta

Brimblecombe, Grossi (2010)

Pietra

$$-dx/dt = Lv \cdot Rn + 0.016[H^+]Rn + 0.18(VdS SO_2(g) + VdN$$

HNO₃(g)

$$-dx/dt = \text{tasso di recessione, } \mu\text{m a}^{-1}$$

Lv = valore di Lipfert, in genere impostato a 18,8 μm

(recessione) m^{-1} (precipitazione), o regolato per modificare la temperatura e la pressione parziale di CO_2

Rn = pioggia in m a^{-1} (presa come pioggia, non

precipitazione, perché la neve è meno efficace per la dissoluzione)

V_{dS} e V_{dN} = velocità di deposizione ($0,38$ e $0,32 \text{ cm sec}^{-1}$)

$SO_2(g)$ e $HNO_3(g)$ = concentrazioni, $\mu\text{g m}^{-3}$

$[H^+]$ = concentrazione di ioni H^+ nell'acqua piovana,

$\mu\text{mol l}^{-1}$

Kucera (2004)

White Mansfield dolomitic sandstone

$$R = 2.0[SO_2]^{0.52} \exp\{f(T)^{0.91} + 0.028 \text{Rain}[H^+]\} t^{0.91}$$

$$f(T) = 0 \text{ when } T \leq 10^\circ\text{C, otherwise } -0.013(T-10)$$

$r^2 = 0.86$ N 101

R = surface recession, μm

t = exposure time, *years*

T = temperature, $^\circ\text{C}$ - annual average

$[SO_2]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average

Rain = amount of precipitation, $m year^{-1}$ - annual average

$[H^+]$ = concentration, $mg l^{-1}$ - annual average

r^2 = coefficiente di correlazione

| | |
|---|--|
| | N = numero di siti coinvolti nell'analisi |
| Warkiss, Eyre, Holland, Rabl, Short (2000) | <p><u>Arenaria calcarea o malta non riparata</u> ICP - unsheltered calcareous sandstone or mortar (4 years), stage II:</p> $ML = 7.3 + 1.56.TOW.SO_2 + 0.12.H^+$ <p><u>Arenaria riparata</u></p> $MI = 0.71 + 0.22.TOW.SO_2$ <p>ICP - sheltered sandstone (4 years), stage III (without later damages such as exfoliation):</p> <p><i>TOW</i> = fraction of time relative humidity exceeds 80% and temperature >0°C</p> <p><i>SO₂</i> = sulphur dioxide concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$</p> <p><i>H⁺</i> = acidity, $\text{meq}/\text{m}^2/\text{year}$</p> |
| Interventi conservativi: principali operazioni manutentive | |
| 1) Operazioni preliminari | 015021-22 Rimozione dei depositi superficiali più o meno coerenti e aderenti a secco |
| | 015023-29 Preconsolidamento e sigillature, protezioni, bendaggi e puntellature provvisorie preliminari alle successive fasi di restauro. |
| 2) Operazioni di consolidamento | 015030-52 Ristabilimento della coesione mediante impregnazione, incollaggio o impernatura. |
| 3) Operazioni di disinfezione o disinfestazione | 015053-56 Disinfestazione mediante applicazione di biocida e rimozione meccanica della vegetazione superiore o di colonie di microrganismi autotrofi o/e |

| | |
|---|---|
| | eterotrofi |
| 4) Operazioni di pulitura | 015057-70 Rimozione di depositi superficiali coerenti, macchie, incrostazioni, croste nere, concrezioni, fissativi, scialbi, sali solubili mediante applicazione di compresse di sali inorganici e/o lavaggi con acqua e successiva rimozione meccanica. |
| 5) Rimozione di stuccature ed elementi impropri | 015072-80 Rimozione meccanica di stuccature ed elementi o sostanze inidonee applicate in precedenti interventi e trattamento per l'arresto dell'ossidazione degli elementi metallici. |
| 6) Operazioni di stuccatura e presentazione estetica | 015081-84 Stuccatura, micorstuccatura con malte e revisione cromatica ad acquerello |
| | Tinteggiatura con colori a base di silicati. |
| 7) Operazioni di protezione | 015103-07 Protezione superficiale con cere, polisilossani, prodotti antigraffito o rivestimenti impermeabilizzanti. |

Bibliografia

- G. Blanco, *Pavimenti e rivestimenti lapidei*, ed. NIS - 1992
- G. Blanco, *Le pietre ornamentali in architettura*, ed. NIS - 1994
- P. Watkiss, N. Eyre, M. Holland, A. Rabl, N. Short, *Impacts of air pollution on building materials*, Draft, 1 Sept. 2000
- International Co-operative Programme on Effects on Materials, including Historic and Cultural Monuments* UNECE, 2004, a cura di V.Kucera (ICP Materials Coordination Centre, Sweden)
- U. Sanna, C. Atzeni (a cura di), *Il manuale tematico della pietra*, DEI tipografia del genio civile 2009
- P. Brimblecombe, C. M. Grossi, *Potential Damage to Modern Building Materials from 21st Century Air Pollution*, NOAH's ARK, 2010
- D. Ponziani, E. Ferrero, L. Appolonia, S. Migliorini, *Effects of temperature and humidity excursions and wind exposure on the arch of Augustus in Aosta*, Journal of Cultural Heritage 13 (2012) p. 462-468
- E. Conz, L. Appolonia, P. Galinetto, M. P. Riccardi, S. Tarantino, M. Zema, *Chromatic alteration of Roman Heritage in Aosta (Italy)*, YOCOCU 2012
- [Prezzario](#): Restauro dei beni artistici ARI, DEI 2016

| <i>Caratteristiche del materiale</i> | |
|--------------------------------------|---|
| Tipologia | Materiale lapideo (naturale o artificiale) |
| Composizione | Il gesso come roccia è formato essenzialmente da solfato di calcio idrato (gesso: $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$) o non idrato (anidrite: CaSO_4), mentre la scagliola (o <i>gesso di Parigi</i>) è gesso semiidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2(\text{H}_2\text{O})$) ottenuto per cottura del solfato di calcio idrato a 150° C. |
| Impiego | <p>Il gesso e l' anidrite come pietra trovano impiego limitato in ambito ornamentale (alabastro di gesso) e vengono utilizzati per la realizzazione di sculture o, lucidati, per rivestimenti di interni.</p> <p>Se cotto, può essere impiegato anche come legante per stucchi, sculture, calchi, modelli, bozzetti, rasature, sottofondi di pareti e pavimenti, imprimiture, preparazioni per sculture in legno o tele dipinte, come imitazione delle superfici lapidee (gesso allumato o "<i>scagliola</i>"), additivo nelle malte o per stucchi speciali (colla edile, gesso refrattario...) oltre che per rivestimenti speciali se accoppiato con altri materiali (cartongesso, fibrogesso per pareti fonoassorbenti o resistenti al fuoco, controsoffitti e incannicciati).</p> |
| Morfologia | Si tratta di una roccia sedimentaria di precipitazione chimica. Le rocce di questo tipo hanno in genere tessitura massiccia o stratificata in bancate da decimetriche a metriche. |
| Descrizione | <p>Il gesso ha struttura microgranulare.</p> <p>L' anidrite è caratterizzata da grana maggiore, talora con struttura saccaroide ("<i>volpinite</i>" di Volpino - Bg).</p> <p>Si trovano anche tipiche forme concrezionate:</p> |

| | |
|--|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • alabastro di gesso o <i>pietra d' angelo</i>, di aspetto traslucido e ceroso; • selenite o <i>pietra di luna</i>, in cristalli tabulari e sfaldabili; • sericolite, in masse fibrose o colonnari. <p>Il colore è molto chiaro, dal bianco al rosa, giallino, beige, grigio.</p> |
| <p>Componenti</p> | <p>Il costituente principale è il solfato di calcio idrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$) o non idrato (anidrite: CaSO_4), quelli secondari, cui in genere si deve il colore della roccia, sono molto vari: più frequenti sono ossidi, solfuri, idrossidi, salgemma, carbonati.</p> <p>Il gesso refrattario è composto da scagliola o gesso da formare (sempre biidrato, ma cotto a 200°C) e cemento Portland al 50%.</p> <p>Il gesso allumato, o marmo artificiale, si ottiene impastando il gesso semiidrato con allume di rocca ($\text{K}_2\text{SO}_4 \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e ricuocendo l' impasto a 550°C.</p> <p>La colla edile per la posa di piastrelle o mattonelle è costituita da gesso da formare e pietra di gesso in parti uguali, silice colloidale sintetica al 2-3% e carbossimetilcellulosa al 3%.</p> |
| <p>Principali caratteristiche prestazionali</p> | <p>Il gesso è una pietra molto tenera (2 della scala di Mohs – 3-3,5 l' anidrite).</p> <p>Peso di volume: 23,5-30 kN/mc Carico di rottura compressione semplice: / Coeff. dilatazione termica: / Coeff. Imbibizione: /</p> <p>Altre proprietà:</p> <ul style="list-style-type: none"> • possiede buon potere adesivo ed è facilmente lavorabile; • non si ritira e può essere lavorato senza inerti (presenta un aumento di volume del 0,3-1,5%, quindi trascurabile in edilizia); • ha tempi rapidi di presa; |

| | |
|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • permette di ottenere superfici fini e lisce; • è resistente al fuoco, termoisolante e fonoisolante; • è molto sensibile all'ammoniaca; • corrode le superfici di acciaio non protette e diventa molle se assorbe umidità. |
|--|--|

Fenomenologia generale del degrado

Il degrado di gesso e anidride è legato essenzialmente a fenomeni chimici di dissoluzione, analoghi ma molto più rapidi rispetto a quelli della calcite e favoriti da reazioni acide nell' acqua legate all' acido carbonico o all' acido solforico, che si formano in atmosfera per processi naturali e per l' inquinamento. Data questa sensibilità agli agenti atmosferici, tali materiali si usano essenzialmente in interni, ma esistono anche esempi di impieghi in esterno (es. Castello del Valentino a Torino, stucchi in facciata).

Considerati la scarsa durezza, l' elevata solubilità e permeabilità alle soluzioni acquose, all' acqua stessa (liquida o vapore) è imputabile il maggiore fattore di degrado, perché in grado di agire per dissoluzione diretta del solfato di calcio, con conseguente disgregazione del materiale o deformazione o alterazione delle strutture di sostegno in metallo, legno o tela con conseguenti rotture nei punti di contatto.

Secondi a essa, i particolati inquinanti che le conferiscono acidità e i depositi atmosferici che causano ingenti alterazioni cromatiche.

Si aggiungono, ai problemi conservativi, i problemi tecnici di pulitura delle superfici, data la grande difficoltà – se non impossibilità – nell' uso di sistemi acquosi.

Fattori di degrado

| | |
|--|--|
| Fattori interni di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - cricche o altri difetti derivanti dalla scultura dell' alabastro; - accoppiamento del gesso con materiali i differenti delle strutture interne (in tela, legno o metallo). |
| Fattori esterni (ambientali) di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - dilavamento; - deposito di agenti inquinanti (NO_x, SO₂, PM₁₀...); - deposito di polveri e ossidi metallici; - aerosol; - elevata umidità ambientale; - risalita capillare; |

| | |
|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> - fenomeni di gelo-disgelo; - correnti eoliche; - stress meccanici; - colonizzazione biologica. |
| Dose-risposta | |
| Non sono state rinvenute in bibliografia relazioni dose-risposta per quanto concerne questo materiale | |
| <p><i>Interventi conservativi: principali operazioni manutentive</i></p> <p>N.B. A seconda che il gesso si trovi all' interno del contesto "intonaco" , si fa riferimento alla relativa scheda tecnica per la sezione <i>Interventi conservativi</i>, nel caso invece si intenda il gesso come materiale lapideo naturale, si dovrà fare riferimento alle schede sui lapidei; le seguenti voci sono estratte dalla sezione Stucchi del prezziario, non esistendone una specifica per i soli manufatti in gesso.</p> | |
| 1) Operazioni preliminari | 27.A07.A15-A25 Asportazione a secco di depositi superficiali più o meno coerenti, mediante pennellesse e piccoli aspiratori |
| 2) Operazioni di pulitura | 27.A07.B05-C20 Descialbo e Rimozione di depositi superficiali coerenti più o meno compatti: macchie, incrostazioni, concrezioni o fissativi mediante soluzioni solventi o gel vegetali |
| 3) Rimozione di stuccature o elementi inidonei | 27.A07.D05-D30 Rimozione di elementi impropri o stuccature mediante riduzione meccanica, asportazione delle parti ossidate e trattamento per l' arresto dell' ossidazione degli elementi metallici. |
| 4) Disinfestazione e disinfezione | 27.A07.E05-E15 Applicazione di prodotto biocida a spruzzo, iniezione o pennello e rimozione meccanica dei microrganismi. |
| 5) Consolidamento | 27.A07.G05-G55 Ristabilimento dell' adesione, coesione e riadesione di scaglie o porzioni di manufatto, con resine acriliche in soluzione, malte o perni in vetroresina. |

| | |
|--|--|
| <p>6) Stuccatura e integrazione plastica</p> | <p>27.A07.H05-H25 Risarcitura, microstuccatura o integrazione plastica di parti mancanti, incluso eventuale distacco di parti pericolanti, con malte, gesso o vetroresina, anche mediante calchi in silicone</p> |
| <p>7) Reintegrazione estetica</p> | <p>27.A07.L10-L20 Riduzione dell' interferenza visiva con colori ad acquerello, ripristino delle dorature o revisione di vecchi interventi o di macchie irreversibili con acquerelli o pastelli.</p> |
| <p>Bibliografia</p> | |
| <p>G. Blanco, <i>Pavimenti e rivestimenti lapidei</i>, ed. NIS - 1992 G. Blanco, <i>Le pietre ornamentali in architettura</i>, ed. NIS – 1994 C. Quaglierini, L. Amorosi, <i>Chimica e tecnologia dei materiali per l' arte</i>, Bologna 1991 Prezzario: Regione Piemonte, sez. 27 restauro, 2018</p> | |

| Caratteristiche del materiale | |
|--------------------------------------|---|
| Tipologia | Materiale lapideo naturale |
| Composizione | <p>Trattandosi di rocce, quindi di un miscuglio di minerali, non hanno una composizione definita da una formula chimica.</p> <p><u>In questa scheda si comprendono le rocce ricche in quarzo (rocce acide: > 50% SiO₂), quali graniti, sieniti, dioriti, porfidi, gneiss, quarziti.</u></p> |
| Impiego | <p>Utilizzate come materiali da costruzione sia allo stato grezzo, semilavorato in blocchi o conci per la realizzazione di murature, cordoli, parti architettoniche (architravi, pietre angolari, chiavi di volta, ecc.) o in lastre per pavimentazioni da esterno. In antichità trovavano applicazioni speciali in virtù della loro resistenza, come pietre da macina.</p> <p>Lucidate rientrano commercialmente nella categoria dei "marmi" e vengono utilizzate per rivestimenti e pavimenti. Malgrado la non semplice lavorabilità legata all'elevata durezza, vengono utilizzate (granito) anche per la realizzazione di sculture.</p> |
| Morfologia | <p>Le rocce magmatiche intrusive o effusive quali graniti, sieniti, dioriti, porfidi, hanno tessitura massiccia, isotropa, granulata. Le rocce metamorfiche quali gli gneiss e le quarziti hanno tessitura orientata, scistosa.</p> |
| Descrizione | <p>Le rocce granitoidi hanno struttura isotropa granulata con grana da molto grossolana (granuli centimetrici) a fine (granuli millimetrici), talora profirica (cristalli grandi in matrice fine) e colore molto vario. In genere si distingue una matrice di minerali chiari (quarzo, feldspati) nella quale sono sparsi in cristalli di minerali scuri (miche, anfiboli).</p> <p>Gli gneiss hanno tessitura orientata più o meno evidente ("scistosa") data dall'alternanza di letti quarzoso-feldspatici e sottili livelli di miche e/o anfiboli. Il colore è in genere grigio.</p> <p>Le quarziti hanno tessitura in genere orientata con livelli centimetrici definiti dalla presenza di sottili livelli micacei. Il colore è chiaro, variabile dal bianco, al rosa al verdino.</p> |
| Componenti | <p>I costituenti principali sono il quarzo (SiO₂) e i feldspati alcalini (silicati di alluminio, sodio e potassio - p.e. Ortoclasio: KAlSi₃O₈), quelli secondari le</p> |

| | |
|--|---|
| | <p>miche (silicati in forma tipicamente lamellare ricchi di alluminio, potassio, sodio, magnesio, calcio, ferro) e anfiboli (silicati in forma tipicamente prismatica ricchi di alluminio, magnesio, calcio, sodio, ferro).</p> |
| <p>Principali caratteristiche prestazionali</p> | <p><u>Per i granitoidi (struttura isotropa)</u></p> <p>Peso di volume: 25-28 kN/mc Carico di rottura compressione semplice: 80.000-200.000 kN/mq (800-2000 kg/cmq) Coeff. dilatazione termica: 0,000005-0,000009 mm/m °C Coeff. Imbibizione: 0,3-0,7%</p> <p><u>Per gli gneiss-quarziti (struttura scistosa)</u></p> <p>Peso di volume: 25-28 kN/mc Carico di rottura compressione semplice: 100.000-400.000 kN/mq (1000-4000 kg/cmq - massimo per quarziti) Coeff. dilatazione termica: 0,000005-0,000009 mm/m °C Coeff. Imbibizione: 0,3-0,7%</p> |
| <p>Fenomenologia generale del degrado</p> | |
| <p>I graniti sono generalmente soggetti a fenomeni concomitanti di alterazione di tipo fisico (che si manifesta con l'insorgenza o l'ampliamento in estensione e in ampiezza delle fessure tra- e inter-granulari, al distacco di scaglie per espansione di acqua, sali, ghiaccio o per rilascio di tensioni dormienti originarie o indotte dalla lavorazione o per coazioni della muratura), biologico o chimico (alterazione con delaminazione e cessione di ioni ferro con conseguenti macchiature della biotite, argillificazione/sericitizzazione dei feldspati, accelerata dalla acidificazione delle acque; l'anortite è meno stabile dell'albite e questa dell'ortoclasio, etc.).</p> <p>In ambienti urbani inquinati le superfici dei manufatti granitici non sono esenti dalla deposizione di croste nere il cui componente gessoso, evidentemente originatosi nell'ambiente aereo, può penetrare nelle fessure contribuendo con i suoi effetti espansivi alla decoesione.</p> <p>La natura polimineralica rende i grani diversamente sensibili al riscaldamento, ma queste differenti caratteristiche termiche non sembrano sufficienti a portare a significativi effetti di degrado in assenza di umidità nelle fessure.</p> <p>In climi asciutti, quindi, il degrado dei materiali lapidei granitoidi è prevalentemente fisico, mentre in ambienti con forte umidità intervengono anche fenomeni chimici.</p> <p><u>Fenomeni chimici</u>: idrolisi dei silicati, in particolare dei feldspati, con l'acqua che porta in soluzione i cationi (SiO₂, Ca, Na, K) e forma minerali argillosi e idrossidi con alluminio e ferro (calcolinizzazione, argillificazione). Ossidazione dei minerali ricchi in ferro (in particolare pirite) presenti in quantità accessorie, che danno luogo a macchie e colature antiestetiche.</p> <p><u>Fenomeni fisici</u>: si tratta principalmente degli sbalzi termici (termoclastismo), meno di fenomeni di gelo-disgelo (crioclastismo) vista la ridotta porosità della roccia. Si verificano fenomeni di scagliatura e esfoliazione della superficie della roccia e di decoesione e distacco dei singoli cristalli. La presenza della scistosità porta per gneiss e quarziti allo spacco in lastre, di elevato spessore per i primi (alcuni centimetri o più), più sottili in genere le seconde (pochi centimetri).</p> <p>La colonizzazione biologica è un'importante e duplice fattore di degrado: se da una parte può inficiare sull'estetica delle superfici (licheni incrostanti, alghe terrestri, batteri...), dall'altra può costituire causa di forti stress meccanici al materiale lapideo (radici di piante superiori) o anche solo alla superficie (muschi, licheni endolitici come ad es. <i>Verrucaria</i>, piante rampicanti...).</p> | |

| Principali fattori di degrado | |
|--|--|
| Fattori interni di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - scistosità del materiale originale, con tendenza alla scagliatura; - disomogeneità mineralogiche. |
| Fattori esterni (ambientali) di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - risalita capillare; - dilavamento; - cicli di gelo-disgelo; - correnti eoliche; - infiltrazioni d'acqua; - deposito di agenti inquinanti (NO_x, SO₂); - deposito di particolato atmosferico (quarzo, gesso, ossidi metallici, composti organici...); - stress meccanici; - colonizzazione biologica. |
| Dose-risposta | |
| Brimblecombe, Grossi (2010) | <p><u>Pietra</u></p> $-dx/dt = Lv \cdot Rn + 0.016[H^+]Rn + 0.18(VdS SO_2(g) + VdN$ <p><i>HNO₃(g)</i></p> $-dx/dt = \text{tasso di recessione, } \mu m a^{-1}$ <p><i>L_v</i> = valore di Lipfert, in genere impostato a 18,8 μm</p> <p>(recessione) m⁻¹ (precipitazione), o regolato per modificare la temperatura e la pressione parziale di CO₂</p> <p><i>Rn</i> = pioggia in m a⁻¹ (presa come pioggia, non precipitazione, perché la neve è meno efficace per la dissoluzione)</p> |

| | |
|---|---|
| | <p>V_{as} e V_{dN}=velocità di deposizione ($0,38$ e $0,32$ $cm\ sec^{-1}$)</p> <p>$SO_2(g)$ e $HNO_3(g)$ = concentrazioni, $\mu g\ m^{-3}$</p> <p>$[H^+]$ = concentrazione di ioni H^+ nell'acqua piovana,</p> <p>$\mu mol\ l^{-1}$</p> |
| Interventi conservativi: principali operazioni manutentive | |
| 1) Operazioni preliminari | 015021-22 Rimozione dei depositi superficiali più o meno coerenti e aderenti a secco |
| | 015023-29 Preconsolidamento e sigillature, protezioni, bendaggi e puntellature provvisorie preliminari alle successive fasi di restauro. |
| 2) Operazioni di consolidamento | 015030-52 Ristabilimento della coesione mediante impregnazione, incollaggio o imperniatura. |
| 3) Operazioni di disinfezione o disinfestazione | 015053-56 Disinfestazione mediante applicazione di biocida e rimozione meccanica della vegetazione superiore o di colonie di microrganismi autotrofi o/e eterotrofi |
| 4) Operazioni di pulitura | 015057-70 Rimozione di depositi superficiali coerenti, macchie, incrostazioni, croste nere, concrezioni, fissativi, scialbi, sali solubili mediante applicazione di compresse di sali inorganici, lavaggi con acqua e rimozione meccanica. |
| 5) Rimozione di stuccature ed elementi impropri | 015072-80 Rimozione meccanica di stuccature ed elementi o sostanze inidonee applicate in precedenti interventi e trattamento per l'arresto dell'ossidazione degli elementi metallici. |
| 6) Operazioni di stuccatura e presentazione estetica | 015081-84 Stuccatura, micorstuccatura con malte e revisione cromatica ad acquerello |
| | Tinteggiatura con colori a base di silicati. |
| 7) Operazioni di protezione | 015103-07 Protezione superficiale con cere, polisilossani, prodotti antigraffito o rivestimenti |

impermeabilizzanti.

Bibliografia

P. Brimblecombe, C. M. Grossi, *Potential Damage to Modern Building Materials from 21st Century Air Pollution*, NOAH's ARK, 2010

U. Sanna, C. Atzeni (a cura di), *Il manuale tematico della pietra*, DEI tipografia del genio civile 2009

J. D. Rodrigues, D. M. Costa, *The conservation of granite in Évora Cathedral. From laboratory to practice*, Proceedings Int. Symp. "Stone Consolidation in Cultural Heritage. Research and Practice", Lisbon, May 2008, pp.101-110

G. Blanco, *Le pietre ornamentali in architettura*, ed. NIS - 1994

G. Blanco, *Pavimenti e rivestimenti lapidei*, ed. NIS - 1992

[Prezzario](#): Restauro dei beni artistici ARI, DEI 2016

| Caratteristiche del materiale | |
|---|--|
| Tipologia | Materiale lapideo naturale. Si tratta di rocce sedimentarie di precipitazione chimica, organogene e di rocce metamorfiche carbonatiche (marmo). |
| Composizione | Trattandosi di rocce, quindi di un miscuglio di minerali, non hanno una composizione definita da una formula chimica. <u>In questa scheda si comprendono le rocce costituite in grande prevalenza da carbonato di calcio (calcite) e carbonato di calcio e magnesio (dolomite) utilizzate come pietra da opera e non come materia prima nell'industria del cemento.</u> |
| Impiego | Utilizzate come materiali da costruzione sia allo stato grezzo, semilavorato in blocchi o conci per la realizzazione di murature, parti architettoniche (architravi, pietre angolari, chiavi di volta, ecc.). Lucidate rientrano commercialmente nella categoria dei "marmi" e vengono utilizzate per rivestimenti e pavimenti . I marmi vengono ampiamente utilizzati anche per la realizzazione di sculture . |
| Morfologia | Le rocce di questo tipo hanno in genere tessitura massiccia o grossolanamente stratificata in bancate da decimetriche a metriche. |
| Descrizione | I marmi hanno struttura tipicamente saccaroide, granulare , legata alla ricristallizzazione dei calcari in ambiente metamorfico. Il colore è molto vario, sia uniforme che screziato o variegato I calcari hanno struttura in genere microgranulare e colore vario, ma in genere chiaro, dal bianco, al grigio al marroncino, con frequente presenza di fossili, che talora possono costituire gran parte della roccia (calcari organogeni). La struttura è talora vacuolare (p.e. travertino). |
| Componenti | I costituenti principali sono la calcite (CaCO_3) e la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), quelli secondari, cui in genere si deve il colore della roccia, sono molto vari: più frequenti sono ematite, limonite, solfuri, idrossidi, pigmenti carboniosi. |
| Principali caratteristiche prestazionali | I marmi sono in generale pesanti, minimamente porosi e resistenti. I calcari hanno caratteristiche piuttosto varie. <u>Per i marmi (struttura isotropa)</u> Peso di volume: 27-27,5 kN/mc Carico di rottura compressione semplice: 70.000-150.000 kN/mq (700-1500 kg/cmq) |

| | |
|--|---|
| | <p>Coeff. dilatazione termica: 0,007 mm/m °C</p> <p>Coeff. Imbibizione: 0,8-5%</p> <p><u>Per le rocce calcaree</u></p> <p>Peso di volume: 20-27 kN/mc</p> <p>Carico di rottura compressione semplice: 10.000-200.000 kN/mq (100-2000 kg/cmq – massimo per quarziti)</p> <p>Coeff. dilatazione termica: 0,005 mm/m °C</p> <p>Coeff. Imbibizione: 5-45 %</p> |
|--|---|

Fenomenologia generale del degrado

Il degrado dei materiali lapidei calcarei è legato sia a fenomeni fisici che chimici.

Fenomeni chimici: dissoluzione della calcite da parte dell'acqua che si combina con la CO₂ atmosferica. Solfatazione, favorita dall'inquinamento: lo zolfo in atmosfera si combina con ossigeno e acqua dando luogo ad acido solforico, che trasforma il carbonato di calcio in solfato di calcio (gesso) (formazione di croste nere). Ossidazione dei minerali ricchi in ferro (in part. Pirite) presenti in quantità accessorie, che danno luogo a macchie e colature antiestetiche.

Fenomeni fisici: si tratta principalmente degli sbalzi termici (termoclastismo) e di fenomeni di gelo-disgelo (crioclastismo), particolarmente attivi per rocce porose. Si verificano fenomeni di scagliatura e esfoliazione della superficie della roccia e di decoesione e sfarinamento con distacco dei singoli cristalli.

Fra le rocce calcaree ve ne sono alcune più soggette al degrado fisico-meccanico come le calcareniti o le marne. In entrambi i casi, il fattore controllante è la loro porosità e la conseguente minore resistenza meccanica rispetto ai calcari compatti. Nel caso delle calcareniti questo aspetto si può dire sia generalmente "distribuito" in maniera omogenea all'interno dei conci; per le marne la frazione argillosa presente rappresenta spesso l'anello debole del sistema, avendo la capacità di assorbire acqua con una certa facilità. L'azione meccanica delle acque meteoriche nel primo caso e i problemi legati alla gelività nel secondo, possono portare a frequenti condizioni di degrado.

La colonizzazione biologica è un'importante e duplice fattore di degrado: se da una parte può inficiare sull'estetica delle superfici (licheni incrostanti, alghe terrestri, batteri...), dall'altra può costituire causa di forti stress meccanici al materiale lapideo (radici di piante superiori) o anche solo alla superfici (muschi, licheni endolitici come ad es. *Verrucaria*, piante rampicanti...).

Fattori di degrado

| | |
|--|--|
| Fattori interni di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - solubilità della calcite in acqua in presenza di diossido di carbonio (anche a livelli "normali"); - minerali accessori ossidabili (specie se ferrosi); - porosità anche molto elevata; - scarsa durezza (rispetto alle rocce ricche di silicio). |
| Fattori esterni (ambientali) di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - risalita capillare; - dilavamento; - cicli di gelo-disgelo; - correnti eoliche; - infiltrazioni; |

| | |
|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> - precipitazioni e umidità atmosferica; - aerosol; - deposito di agenti inquinanti (NO_x, SO₂); - deposito di particolato atmosferico PM_x (quarzo, gesso, ossidi metallici, composti organici...); - stress meccanici; - colonizzazione biologica. |
| Dose-risposta | |
| <p>Christodoulakis, Tzanis, Varotsos, Ferm, Tidblad (2016)</p> | $R = 4 + 0.002[SO_2]Rh_{60} + 0.054Rain[H^+] + 0.05[HNO_3]Rh_{60} + 0.106PM_{10}$ <p><i>R</i> = surface recession per year, μm (absolute value)</p> <p>$[SO_2]$ = annual average concentration, $\mu g m^{-3}$</p> <p><i>Rh</i> = annual average of relative humidity (%), Rh_{60} = <i>Rh</i> – 60 when <i>Rh</i>>60, 0 otherwise</p> <p><i>Rain</i> = amount of precipitation, $\mu g m^{-3}$</p> <p>$[H^+]$ = annual average concentration, $mg L^{-1}$</p> <p>$[HNO_3]$ = annual average concentration, $\mu g m^{-3}$</p> <p>$[PM_{10}]$ = annual average concentration, $\mu g m^{-3}$</p> |
| <p>Kucera et al. (2007)</p> <p>Multiassess1 (Model for multi-pollutant impact and assessment of threshold levels for cultural heritage)</p> | $R = 4 + 0.0059 \cdot [SO_2] \cdot Rh_{60} + 0.054 \cdot Rain \cdot [H^+] + 0.078 \cdot [HNO_3] \cdot Rh_{60} + 0.0258 \cdot [PM_{10}]$ <p><i>R</i> = recessione superficiale, $\mu m/anno$</p> <p>$[SO_2]$ = concentrazione di biossido di zolfo, $\mu g/m^3$</p> <p>$[HNO_3]$ = concentrazione di acido nitrico, $\mu g/m^3$</p> <p>$[PM_{10}]$ = concentrazione di particolato atmosferico, $\mu g/m^3$</p> <p>Rh_{60} = umidità relativa Rh-60, %</p> <p>$[H^+]$ = concentrazione di ioni idrogeno, mg/l</p> <p><i>Rain</i> = precipitazioni, $mm/anno$</p> <p>in particolare:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 4: valore calcolato sperimentalmente che rappresenta il degrado in assenza di inquinanti - 0.054 • Rain • [H⁺]: effetto della pioggia acida - 0.0059 • [SO₂] • Rh₆₀: deposizione di SO₂ |
| <p>Kucera (2004)</p> | <p><u>Limestone</u></p> $R = 2.7[SO_2]^{0.48} \exp\{-0.010T\}t^{0.96} + 0.019Rain[H^+]t^{0.96}$ <p>r^2 0.88 N 100</p> <p><i>R</i> = surface recession, μm</p> |

| | |
|---|--|
| | <p>t = exposure time, <i>years</i></p> <p>T = temperature, °C - annual average</p> <p>$[SO_2]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average</p> <p>$Rain$ = amount of precipitation, $m year^{-1}$ – annual average</p> <p>$[H^+]$ = concentration, $mg l^{-1}$ – annual average</p> <p>r^2 = coefficiente di correlazione</p> <p>N = numero di siti coinvolti nell'analisi</p> |
| Warkiss, Eyre, Holland, Rabl, Short (2000) | <p><u>Calcare non riparato</u></p> $ML = 8.6 + 1.49.TOW.SO_2 + 0.097.H^+$ <p><u>Calcare riparato</u></p> $MI = 0.59 + 0.20.TOW.SO_2$ <p>TOW = fraction of time relative humidity exceeds 80% and temperature $>0^\circ C$</p> <p>SO_2 = sulphur dioxide concentration, $\mu g/m^3$</p> <p>H^+ = acidity, $meq/m^2/year$</p> |
| Lipfert (1989) | $L = 18,8R + 0,016(H^+)R + 0,18(V_{as}[SO_2] + V_{dN} [HNO_3])$ <p>L = recessione superficiale, $\mu m/anno$</p> <p>18.8 = solubilità del $CaCO_3$ in equilibrio con 330 ppm CO_2</p> <p>R = precipitazione annua, $m/anno$</p> <p>0.016 = costante valida per precipitazioni con pH 3-5</p> <p>$[H^+]$ = concentrazione di ioni idrogeno valutata in base al pH medio annuo, ion/l</p> <p>0.18 = fattore di conversione da (cm/s) ($\mu g/m^3$) a μm</p> <p>V_{as} = velocità di deposizione di SO_2, cm/s</p> <p>$[SO_2]$ = concentrazione di SO_2, $\mu g/m^3$</p> <p>V_{dN} = velocità di deposizione di HNO_3, cm/s</p> <p>$[HNO_3]$ = concentrazione di HNO_3, $\mu g/m^3$</p> |
| Vladimir Kucera & Johan Tidblad & Katerina Kreislova & Dagmar Knotkova & Markus Faller & Daniel Reiss & Rolf Snethlage & Tim Yates & Jan Henriksen & Manfred Schreiner & Michael Melcher & Martin Ferm & Roger-Alexandre Lefèvre & Joanna Kobus (2007) | $R = 3.1 + t(0.85) + 0.0059 Rh_{60} [SO_2]$ $+ 0.078Rh_{60} [HNO_3] + 0.054Rain [H^+] + 0.0258 PM_{10}$ <p>ML = mass loss, $g m^{-2}$</p> <p>t = exposure time, years</p> <p>Rh_{60} = relative humidity, % - annual average; = (Rh -60) when $Rh > 60$; otherwise 0</p> <p>T = temperature, °C - annual average</p> <p>$[SO_2]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average</p> <p>$[H^+]$ = concentration, $mg l^{-1}$ - annual average</p> |

| | |
|--|--|
| | <p>$[HNO_3]$ = concentration, $\mu g m^{-3}$ - annual average</p> <p>$[Cl]$ = concentration, $mg l^{-1}$ - annual average</p> <p>PM10 PM concentration $\mu g m^{-3}$ (<10 μm)</p> <p>Rain Amount of precipitation $mm year^{-1}$</p> |
| Interventi conservativi: principali operazioni manutentive | |
| 1) Operazioni preliminari | 015021-22 Rimozione dei depositi superficiali più o meno coerenti e aderenti a secco |
| | 015023-29 Preconsolidamento e sigillature, protezioni, bendaggi e puntellature provvisorie preliminari alle successive fasi di restauro. |
| 2) Operazioni di consolidamento | 015030-52 Ristabilimento della coesione mediante impregnazione, incollaggio o impernatura. |
| 3) Operazioni di disinfezione o disinfestazione | 015053-56 Disinfestazione mediante applicazione di biocida e rimozione meccanica della vegetazione superiore o di colonie di microrganismi autotrofi o/e eterotrofi |
| 4) Operazioni di pulitura | 015057-70 Rimozione di depositi superficiali coerenti, macchie, incrostazioni, croste nere, concrezioni, fissativi, scialbi, sali solubili mediante applicazione di compresse di sali inorganici e/o lavaggi con acqua e successiva rimozione meccanica. |
| 5) Rimozione di stuccature ed elementi impropri | 015072-80 Rimozione meccanica di stuccature ed elementi o sostanze inidonee applicate in precedenti interventi e trattamento per l'arresto dell'ossidazione degli elementi metallici. |
| 6) Operazioni di stuccatura e presentazione estetica | 015081-84 Stuccatura, micorstuccatura con malte e revisione cromatica ad acquerello |
| | Tinteggiatura con colori a base di silicati. |
| 7) Operazioni di protezione | 015103-07 Protezione superficiale con cere, polisilossani, prodotti antigraffito o rivestimenti impermeabilizzanti. |
| | [SPERIMENTALE] Stesura di protettivo a base di diossido di titanio. (Smart surfaces... 2012) |
| Bibliografia | |
| <p>R. A. Livingston, <i>Acid rain attack on outdoor sculpture in perspective</i>, Atmospheric Environment 146, 2016 p. 332-345</p> <p>F. Di Turo, C. Proietti, A. Screpanti, M. F. Fornasier, I. Cionni, G. Favero, A. De Marco, <i>Impacts of air pollution on cultural heritage corrosion at European level: What has been achieved and what are the future scenarios</i>, Environmental Pollution 218, 2016, p. 586-594</p> <p>F. Di Turo, C. Proietti, A. Screpanti, M. F. Fornasier, I. Cionni, G. Favero, A. De Marco, <i>Effects of Air Pollution on Materials and Cultural Heritage</i>, International Journal of Corrosion, Pollution 218, 2016, p. 586-594</p> | |

J. Christodoulakis, C. G. Tzanis, C. A. Varotsos, M. Fero, J. Tidblad, *Impacts of air pollution and climate on materials in Athens, Greece*, Atmos. Chem. Phys. Discuss.196, 2016

E. Quagliarini, F. Bondioli, G. B. Goffredo, A. Licciulli, P. Munafò, *Smart surfaces for architectural heritage: Preliminary results about the application of TiO₂-based coatings on travertine*, Journal of Cultural Heritage 13, 2012, p. 204–209

A. Bonazza, P. Messina, C. Sabbioni, C. M. Grossi, P. Brimblecombe, *Mapping the impact of climate change on surface recession of carbonate buildings in Europe*, The Science of the Total Environment 407, 2009

U. Sanna, C. Atzeni (a cura di), *Il manuale tematico della pietra*, DEI tipografia del genio civile 2009

International Co-operative Programme on Effects on Materials, including Historic and Cultural Monuments UNECE, 2004, a cura di V.Kucera (ICP Materials Coordination Centre, Sweden)

P. Watkiss, N. Eyre, M. Holland, A. Rabl, N. Short, *Impacts of air pollution on building materials*, Draft, 1 Sept. 2000

M. Realini, R. Negrotti, L. Appolonia, D. Vaudan, *Deposition of particulate matter on stone surfaces: an experimental verification of its effects on Carrara marble*, The Science of the Total Environment 167, 1995, p. 67-72

G. Blanco, *Le pietre ornamentali in architettura*, ed. NIS – 1994

G. Blanco, *Pavimenti e rivestimenti lapidei*, ed. NIS - 1992

[Prezzario](#): Restauro dei beni artistici ARI, DEI 2016

| Caratteristiche del materiale | |
|--|--|
| Tipologia | Materiale lapideo naturale |
| Composizione | <p>Trattandosi di rocce, quindi di un miscuglio di minerali, non hanno una composizione definita da una formula chimica.</p> <p>In questa scheda si comprendono le rocce povere in quarzo (rocce basiche: > 52% SiO₂ e ultrabasiche > 45% SiO₂), quali gabbri, basalti, peridotiti, prasiniti, serpentiniti, oficalce, spesso caratterizzate da una significativa componente carbonatica (p.e. oficalce).</p> |
| Impiego | Utilizzate come materiali da costruzione in genere allo stato grezzo, semilavorato in blocchi o conci per la realizzazione di murature e rivestimenti . Talora vengono lucidate (p.e. serpentinite, oficalce) e rientrano commercialmente nella categoria dei "marmi" ("marmo verde") e vengono utilizzate per rivestimenti e pavimenti . |
| Morfologia | Si tratta di rocce magmatiche basiche e dei loro derivati metamorfici ("pietre verdi"). Le rocce di questo tipo hanno in genere tessitura massiccia o grossolanamente scistosa in bancate decimetriche. |
| Descrizione | <p>Le rocce basiche hanno struttura isotropa granulare con grana da molto grossolana (granuli centimetrici) a fine (granuli millimetrici) e colore in genere scuro (grigio scuro, verde, nero). Talora si distingue una matrice di minerali chiari (feldspati) nella quale sono sparsi in cristalli di minerali scuri (anfibioli, pirosseni).</p> <p>I derivati metamorfici ("pietre verdi") hanno tessitura orientata più o meno evidente ("scistosa"), legata alla disposizione orientata dei minerali di forma allungata o fibrosa (anfibioli, clorite, serpentino). Il colore prevalente è il verde, talora screziato per la presenza di vene bianche di calcite (oficalce).</p> |
| Componenti | <p>I costituenti principali sono e i feldspati calcici (silicati di alluminio, calcio, sodio – p.e. Plagioclasio calcico: CaAl₂Si₂O₈), gli anfibioli, l'olivina e i pirosseni (silicati in forma tipicamente prismatica ricchi di alluminio, ferro, calcio, magnesio, sodio).</p> <p>Possono essere abbondanti minerali secondari quali ossidi (magnetite) e solfuri (pirite) Nei derivati metamorfici sono abbondanti la clorite, il serpentino e gli epidoti.</p> |
| Principali caratteristiche prestazionali | <p>Le caratteristiche prestazionali sono in genere molto buone o buone per i litotipi magmatici, meno per quelli metamorfici, in particolare le serpentiniti.</p> <p>Peso di volume: 25-31 kN/mc Carico di rottura compressione semplice: 150.000-300.000 kN/mq</p> |

| | |
|---|--|
| | (1500-3000 kg/cmq) Coeff. dilatazione termica: 0,007-0,009 mm/m °C Coeff. Imbibizione: 0,5 -1 % |
| Fenomenologia generale del degrado | |
| <p>La microstruttura del basalto è caratterizzata da individui cristallini spesso ben sviluppati, immersi in una matrice a grana molto fine o amorfa, attraversata frequentemente da una rete di microlesioni. Differente è la stabilità chimica dei minerali rispetto agli agenti meteorici ed in particolare all'acqua. La presenza di una rete di microlesioni ne favorisce la penetrazione e le conseguenti reazioni. La neoformazione di minerali del gruppo delle argille, fillosilicati, è il principale prodotto di alterazione.</p> <p>Il degrado delle rocce basiche e ultrabasiche è legato sia a fenomeni fisici che chimici, per questi ultimi con processi assimilabili a quelli delle rocce granitoidi per quanto riguarda i feldspati, ma anche pirosseni e olivina, che sono soggetti al fenomeno dell'idrolisi (vedi scheda rocce granitoidi). Nei litotipi con significativa componente carbonatica (oficalce) si possono verificare processi di dissoluzione simili a quelli descritti per le rocce calcaree (vedi scheda rocce calcaree).</p> <p>Gli abbondanti minerali ricchi in ferro (ossidi, solfuri) sono soggetti a processi di ossidazione, con alterazioni cromatiche della roccia e rigonfiamenti. In generale, le fasi che costituiscono le rocce di origine più profonda, quali appunto le rocce basiche e ultrabasiche, sono maggiormente in disequilibrio nelle condizioni di P/T superficiali e quindi maggiormente soggette ai fenomeni di degrado chimico (Serie di Goldich). Per questo motivo le rocce basiche sono utilizzate in prevalenza per impieghi in interni piuttosto che all'esterno.</p> <p>Anche queste rocce sono soggette ai fenomeni fisici legati agli sbalzi termici (termoclastismo) e ai fenomeni di gelo-disgelo (crioclastismo), in particolare quando la roccia ha subito già un'alterazione superficiale per attacco chimico che ne ha aumentato la porosità. Si verificano fenomeni di scagliatura ed esfoliazione della superficie della roccia e di decoesione e sfarinamento con distacco dei singoli clasti. Le pietre verdi sono maggiormente sensibili al degrado, per la presenza di una foliazione e di minerali teneri quali la clorite e il serpentino.</p> <p>La colonizzazione biologica è un'importante e duplice fattore di degrado: se da una parte può inficiare sull'estetica delle superfici (licheni incrostanti, alghe terrestri, batteri...), dall'altra può costituire causa di forti stress meccanici al materiale lapideo (radici di piante superiori) o anche solo alla superficie (muschi, licheni endolitici come ad es. <i>Verrucaria</i>, piante rampicanti...).</p> | |
| Fattori di degrado | |
| Fattori interni di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - minerali ferrosi soggetti a ossidazione; - scistosità; - porosità. |
| Fattori esterni (ambientali) di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - risalita capillare; - dilavamento; - cicli di gelo-disgelo; - correnti eoliche; - infiltrazioni; - precipitazioni e umidità atmosferica; - aerosol; - deposito di agenti inquinanti (NO_x, SO₂); - deposito di particolato atmosferico PM_x (quarzo, gesso, ossidi metallici, composti organici...); - piogge acide; |

| | |
|---|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> - stress meccanici; - colonizzazione biologica. |
| Dose-risposta | |
| Brimblecombe, Grossi (2010) | <p><u>Pietra</u></p> $-dx/dt = Lv \cdot Rn + 0.016[H^+]Rn + 0.18(VdS SO_2(g) + VdN$ <p><i>HNO₃(g)</i></p> <p>$-dx/dt =$ tasso di recessione, $\mu m a^{-1}$</p> <p>$Lv =$ valore di Lipfert, in genere impostato a 18,8 μm (recessione) m</p> <p>$^{-1}$ (precipitazione), o regolato per modificare la temperatura e la pressione parziale di CO_2</p> <p>$Rn =$ pioggia in $m a^{-1}$ (presa come pioggia, non precipitazione, perché la neve è meno efficace per la dissoluzione)</p> <p>V_{dS} e $V_{dN} =$ velocità di deposizione ($0,38$ e $0,32 cm sec^{-1}$)</p> <p>$SO_2(g)$ e $HNO_3(g) =$ concentrazioni, $\mu g m^{-3}$</p> <p>$[H^+] =$ concentrazione di ioni H^+ nell'acqua piovana, $\mu mol l^{-1}$</p> |
| Interventi conservativi: principali operazioni manutentive | |
| 1) Operazioni preliminari | 015021-22 Rimozione dei depositi superficiali più o meno coerenti e aderenti a secco |

| | |
|---|---|
| | 015023-29 Preconsolidamento e sigillature, protezioni, bendaggi e puntellature provvisorie preliminari alle successive fasi di restauro. |
| 2) Operazioni di consolidamento | 015030-52 Ristabilimento della coesione mediante impregnazione, incollaggio o impernatura. |
| 3) Operazioni di disinfezione o disinfestazione | 015053-56 Disinfestazione mediante applicazione di biocida e rimozione meccanica della vegetazione superiore o di colonie di microrganismi autotrofi o/e eterotrofi |
| 4) Operazioni di pulitura | 015057-70 Rimozione di depositi superficiali coerenti, macchie, incrostazioni, croste nere, concrezioni, fissativi, scialbi, sali solubili mediante applicazione di compresse di sali inorganici e/o lavaggi con acqua e successiva rimozione meccanica. |
| 5) Rimozione di stucature ed elementi impropri | 015072-80 Rimozione meccanica di stucature ed elementi o sostanze inidonee applicate in precedenti interventi e trattamento per l'arresto dell'ossidazione degli elementi metallici. |
| 6) Operazioni di stuccatura e presentazione estetica | 015081-84 Stuccatura, microstuccatura con malte e revisione cromatica ad acquerello |
| | Tinteggiatura con colori a base di silicati. |
| 7) Operazioni di protezione | 015103-07 Protezione superficiale con cere, polisilossani, prodotti antigraffito o rivestimenti impermeabilizzanti. |
| Bibliografia | |
| <p>P. Brimblecombe, C. M. Grossi, <i>Potential Damage to Modern Building Materials from 21st Century Air Pollution</i>, NOAH's ARK, 2010</p> <p>U. Sanna, C. Atzeni (a cura di), <i>Il manuale tematico della pietra</i>, DEI tipografia del genio civile 2009</p> <p>G. Blanco, <i>Le pietre ornamentali in architettura</i>, ed. NIS – 1994</p> <p>G. Blanco, <i>Pavimenti e rivestimenti lapidei</i>, ed. NIS - 1992</p> <p>Prezzario: Restauro dei beni artistici ARI, DEI 2016</p> | |

CALCESTRUZZO - CEMENTO

| <i>Caratteristiche del materiale</i> | |
|--------------------------------------|--|
| Tipologia | Materiale lapideo artificiale |
| Composizione | <p>Malta cementizia varia nella natura, dimensione e proporzione dei componenti.</p> <p><u>Questa scheda analizza sia il cemento come legante puro, sia combinato con inerti (calcestruzzo) o armature metalliche (cemento armato).</u></p> |
| Impiego | <p>Utilizzato in edilizia per la costruzione di strutture moderne (edifici, ponti, viadotti, acquedotti...) o per rivestimenti murali (intonaci) oltre che solai, muri di contenimento di terrapieni ed elementi prefabbricati (travi e pilastri), sculture e decorazioni (fregi, cornici, stucchi...) realizzati per colatura in controforme.</p> |
| Morfologia | <p>Con il termine cemento, o più propriamente cemento idraulico, si intende una varietà di materiali da costruzione, noti come leganti idraulici ricavati dalla cottura di rocce calcaree e argille, che miscelati con acqua sviluppano proprietà adesive (proprietà idrauliche).</p> <p>La pasta cementizia o boiaccia (cemento e acqua) viene impiegata come legante in miscela con materiali inerti come sabbia, ghiaia o pietrisco:</p> <ul style="list-style-type: none"> • nel caso in cui la pasta di cemento si misceli con un aggregato fino (sabbia) si ha la malta di cemento [vedi Scheda tecnica: INTONACI]; • nel caso in cui alla pasta di cemento si uniscano aggregati di diverse dimensioni (sabbia, ghiaietto e ghiaia), secondo una determinata curva granulometrica, si ottiene il calcestruzzo; • nel caso in cui il calcestruzzo venga accoppiato con un'armatura costituita da tondini di acciaio, opportunamente posizionati, si ha il calcestruzzo armato (indicato erroneamente con il nome di cemento armato). Con la normativa del 1971 prende il nome di conglomerato cementizio armato. |
| Descrizione | <p>Secondo la normativa UNI EN 197-1, 2007 si differenziano i cementi in:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cemento Portland: ammette al massimo il 5% di altri componenti oltre al gesso (<10%) • Cemento Portland alla loppa, ai fumi di silice, alla pozzolana, alle ceneri volanti, allo scisto calcinato, al calcare o composito: con i componenti aggiuntivi di cui prendono il nome e che impartiscono caratteristiche particolari. Il limite di aggiunta è tra il 6 e il 35% • Cemento d'Alto Forno: contiene dal 36 al 95% di loppa • Cemento pozzolanico: contiene dall'11 al 55% di materiali pozzolanici |

| | |
|---|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Cemento composito: contiene sia loppa che pozzolana del 18 al 50% <p>Oltre a questi, sono presenti altre tipologie di cementi quali:</p> <p>Cemento a presa rapida o Romano (<i>Parker's Cement, Cemento Naturale</i>), brevettato nel 1796, di colore bruno chiaro e largamente impiegato a scopo decorativo dell'architettura, oltre che per opere ingegneristiche. Ha un contenuto di argilla > 25% (più elevato del Portland).</p> <p>Cemento Alluminoso: miscela di allumina (>35%), silice e ossido o carbonato di calcio.</p> <p>Cemento Ferrico o Ferrari: micela di calcare, argilla e pirite (per aumentare il contenuto di Fe_2O_3), impermeabile e molto resistente alle acque solfatiche.</p> <p>Cementi espansivi: cemento Portland con agenti espansivi che riducono le fessurazioni da ritiro.</p> <p>Cemento soprasolfato: 80-85% di loppa granulata, 10-15% di anidrite e 5% di Portland. Resiste all'azione dei solfati, dell'acqua di mare e all'attacco chimico da parte di acidi, ma ha minore resistenza meccanica rispetto al Portland.</p> <p>Cemento bianco: per alcuni impieghi specifici (intonaci, pavimentazioni, manufatti decorativi...), privo di sali di ferro.</p> <p>Cemento bianco al titanio: di colore bianco candido, <u>il biossido di titanio agisce da fotocatalizzatore (in presenza di luce e aria ossida gli inquinanti organici e inorganici, non permettendogli di depositarsi).</u></p> <p>Cemento amianto o fibrocemento (Eternit)</p> |
| <p>Fenomenologia generale del degrado</p> | |
| <p>La durabilità del calcestruzzo è influenzata da numerosi fattori, interni ed esterni, classificati come chimici, fisici e meccanici. Le più comuni cause di degrado dipendono dalla porosità e dalla permeabilità del conglomerato, poiché permettono agli agenti aggressivi di penetrare all'interno del conglomerato.</p> <p>In linea di massima è sempre possibile confezionare un calcestruzzo durevole capace di resistere all'azione aggressiva degli agenti definiti naturali, più difficile garantire la durabilità di un calcestruzzo a contatto con agenti aggressivi artificiali a meno che non si ricorra ad un rivestimento protettivo.</p> <p>Per quanto concerne le cause definite fisiche, mentre è possibile confezionare calcestruzzi resistenti in ambienti con alternanze termiche intorno a 0 °C, diventa pressoché impossibile eliminare le conseguenze (ritiro e/o fessurazione) derivanti dall'evaporazione dell'acqua dal calcestruzzo in climi asciutti: utilizzando calcestruzzi speciali contenenti agenti espansivi si può solo limitare il fenomeno.</p> <p>Anche per le cause meccaniche non è sempre possibile confezionare un calcestruzzo che di per sé sia capace di resistere all'azione degradante degli urti, abrasioni, cavitazione, ecc. e occorre ricorrere anche a rivestimenti protettivi capaci di rinforzare la superficie del materiale.</p> <p>È importante aggiungere che il cemento stesso può costituire un fattore di degrado se accoppiato ad intonaci di calce, per la sua durezza e rigidità nettamente superiori, per l'inferiore traspirabilità all'acqua e al vapore e per il rilascio di notevoli quantità di sali che vengono portati in soluzione dal cemento alle malte di calce, con conseguenti fenomeni di disgregazione di quest'ultime [vedi Scheda tecnica Intonaci].</p> | |
| <p>Fattori di degrado</p> | |
| <p>Fattori interni di degrado</p> | <ul style="list-style-type: none"> • una progettazione delle strutture e dei dettagli costruttivi inadeguata alle condizioni di esercizio e di esposizione; |

| | |
|---|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • modalità esecutive non idonee quali errori di confezionamento, trasporto, posa in opera, compattazione, stagionatura del calcestruzzo; posizionamento non corretto delle armature metalliche e di eventuali inserti; mancato rispetto del copriferro minimo; • materiali di cattiva qualità (es. Reazione alcali aggregati); • composizione non conforme alle specifiche prescritte dal progettista. <p>Tutti i suddetti fattori sono causa di aumento della permeabilità del calcestruzzo sia per aumento della porosità della matrice cementizia che per formazione di fessure di ampiezza superiore ai limiti ammissibili, agevolando la penetrazione di sostanze aggressive e il conseguente degrado del materiale.</p> <p>I fattori che agiscono sulla permeabilità/porosità del calcestruzzo sono:</p> <ul style="list-style-type: none"> • il dosaggio di cemento • il rapporto a/c • il grado di idratazione raggiunto al momento dell'esposizione all'ambiente aggressivo • l'essiccazione del manufatto • l'omogeneità del calcestruzzo. |
| <p>Fattori esterni (ambientali) di degrado</p> | <p>Cause fisiche esterne:</p> <ul style="list-style-type: none"> • cicli di gelo-disgelo: se il grado di saturazione del calcestruzzo è superiore al 91,7% (grado di saturazione critica) l'aumento di volume dell'acqua provocato dal congelamento non è più in grado di essere contenuto all'interno dei pori non ancora saturi di acqua. Il fenomeno degradante si manifesta sotto forma di fessurazioni, sfaldamenti e distacchi superficiali. • Variazioni igrometriche: quando l'umidità relativa dell'ambiente scende sotto il 95% il calcestruzzo tende ad essiccarsi (ritiro). L'essiccamento è più intenso nella parte più superficiale, che di conseguenza subisce un ritiro più marcato della parte più interna. Questa situazione fa insorgere delle tensioni che sollecitano a trazione la parte corticale. Se tali tensioni superano la resistenza a trazione del calcestruzzo insorgono le fessure. <p>Cause chimiche esterne:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ossigeno (solo ove è presente un'armatura in ferro, con conseguente ossidazione del metallo) • Anidride carbonica CO₂: la sua combinazione con l'idrossido di calcio, proveniente dalla pasta di cemento indurita, forma carbonato di calcio (decalcificazione): $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ <p>Questa reazione determina la carbonatazione dell'idrossido di calcio presente nella matrice cementizia, provocando la diminuzione del pH della pasta cementizia che, per un calcestruzzo completamente carbonatato, scende da 13 a circa 8,5. In queste condizioni il ferro d'armatura non è più passivato</p> |

| | |
|---|--|
| | <p>e in presenza di umidità e ossigeno si ossida e si corrode.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Anidride solforosa SO₂: tende a trasformarsi in anidride solforica, SO₃ e, in presenza di umidità, in acido solforico H₂SO₄: $2SO_2 + O_2 \rightarrow 2SO_3$ $SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$. <p>Tali reazioni sono molto lente, ma possono essere <u>accelerate dalla presenza di alcuni inquinanti presenti nell'atmosfera PM₁₀ (ossidi metallici, particelle carboniose, ecc.) in grado di comportarsi da catalizzatori</u>. In presenza di questo agente aggressivo il pH dell'acqua meteorica si aggira a 3,5 - 4 durante i primi minuti di pioggia. A questi valori del pH la protezione del calcestruzzo, anche a elevata impermeabilità è molto limitata. Oltre alla ovvia azione corrosiva dell'acido solforico, in presenza di questo agente aggressivo avviene anche la solfatazione del carbonato di calcio (che si genera a seguito della carbonatazione dell'idrossido di calcio) e che porta alla trasformazione del carbonato di calcio in gesso secondo la seguente reazione: $H_2SO_4 + CaCO_3 \rightarrow CO_2 + CaSO_4 \cdot 2H_2O$.</p> <p>Il gesso, reagendo con l'alluminato tricalcico C₃A presente nella matrice cementizia, dà origine all'ettringite, i cui poteri devastanti sono noti. Inoltre l'acido solforico non trasformato attacca direttamente sia l'idrossido di calcio che non ha ancora subito la carbonatazione (decalcificazione) secondo la seguente reazione: $H_2SO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$; che, per contatto con l'armatura metallica forma solfuro di ferro.</p> <p>Cause biologiche:</p> <ul style="list-style-type: none"> • fouling (incrostazione biologica): nello specifico il più aggressivo idrogeno solforato o acido solfidrico H₂S si genera nelle fognature a seguito dei processi metabolici di batteri anaerobici solfatoriduttori. L'idrogeno solforato, a contatto con l'aria si trasforma, in acido solforico, che è la causa del degrado del calcestruzzo secondo i meccanismi descritti al punto precedente. <p>Cause meccaniche:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Urto, scoppio, cavitazione • Erosione, abrasione • Sisma • Vibrazioni • Assestamenti strutturali • carichi non previsti • carichi ciclici (fatica) |
| <p>Acque contenenti anidride carbonica</p> | <p>Il fenomeno del dilavamento del calcestruzzo è amplificato se l'acqua presenta anidride carbonica aggressiva (anidride carbonica libera solubile in acqua sotto forma di acido carbonico che dissociandosi in ioni H⁺ e HCO₃⁻ e CO₃²⁻ conferisce all'acqua un pH inferiore a 7), capace di trasformare l'idrossido di calcio in bicarbonato di calcio, notevolmente solubile, secondo la reazione a</p> |

| | |
|--|--|
| | <p>due stadi:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. $\text{CO}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ 2. $\text{CO}_2 + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ <p>Il fenomeno del dilavamento del calcestruzzo avviene più rapidamente all'aumentare della temperatura ambientale, della velocità dell'acqua, della porosità iniziale del conglomerato o dell'estensione della superficie di contatto liquido-solido. In tutti i casi in cui vi è il pericolo di dilavamento della calce si devono usare cementi resistenti al dilavamento.</p> |
| <p>Acque solfatiche</p> | <p>Si tratta prevalentemente di acque naturali (acque meteoriche, sotterranee, sorgive, ecc.) che attraversano suoli argillosi, con possibili inquinanti locali (terreni gessosi) contenenti ione solfato SO_4^{2-}.</p> <p>I solfati si possono trovare anche in acque industriali o in quelle reflue.</p> <p>I più comuni sono i solfati di sodio, potassio, calcio, magnesio ed ammonio; i più pericolosi però per la durabilità del calcestruzzo sono gli ultimi due per la concomitante azione aggressiva dei suoi cationi.</p> <p>Lo ione solfato, se proveniente da solfati diversi da quello di calcio, reagisce con l'idrossido di calcio presente nel calcestruzzo a seguito dell'idratazione del cemento.</p> $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{OH}^-$ <p>Il gesso successivamente reagisce con l'alluminato tricalcico con formazione di ettringite che deteriora gravemente il calcestruzzo (attacco solfatico).</p> <p>In particolari condizioni ambientali, come freddi (0-10 °C), umidi (UR > 95%) o ricchi di anidride carbonica il gesso, formatosi per reazione tra lo ione solfato e l'idrossido di calcio, reagisce con i silicati idrati di calcio, la calce stessa e l'anidride carbonica con formazione di thaumasite.</p> <p>L'effetto della thaumasite è molto devastante poiché interessa i silicati idrati di calcio dai quali dipende principalmente il potere legante del cemento. In caso di attacco solfatico, è preferibile utilizzare cementi resistenti ai solfati, i quali hanno un basso contenuto di alluminato tricalcico.</p> <p>Se c'è il pericolo di formazione della thaumasite, tali cementi però non sono idonei visto che in questo caso la reazione distruttiva avviene tra gesso e silicati idrati di calcio.</p> |
| <p>Acque con cloruri (non marine)</p> | <p>Le acque con cloruri non marine sono le acque che disciolgono e trasportano i sali disgelanti utilizzati sulle strade, autostrade, aeroporti, ecc., durante l'inverno per la rimozione del ghiaccio. lo ione cloruro Cl^-, penetrando nella massa del calcestruzzo raggiunge le armature metalliche, riducendo rapidamente la passivazione dei ferri anche in situazione di calcestruzzo non carbonatato, cioè con pH 13.</p> <p>La diffusione dello ione cloruro nel calcestruzzo può essere dedotta dalla seconda legge di Fick: $x = 4(Dt)^{1/2}$</p> |

| | |
|---|---|
| | <p>dove:</p> <p>x = lo spessore di calcestruzzo in mm penetrato dal cloruro</p> <p>t = il tempo di esposizione in secondi</p> <p>D = coefficiente di diffusione espresso in mm²/s</p> <p>In presenza di ossigeno si attiva il fenomeno di ossidazione delle armature, definito in questo caso pitting corrosion, non accompagnato dalla formazione di ossidi espansivi e quindi da distacco del copriferro (come accade di solito quando la corrosione è innescata dal fenomeno della carbonatazione), e quindi estremamente pericoloso in quanto il danno non è facilmente rilevabile ed è causa di una grave riduzione della sezione dell'armatura.</p> <p>Come sali disgelanti sono normalmente utilizzati il cloruro di sodio NaCl cloruro di calcio CaCl₂ che è largamente più usato del precedente poiché la sua azione disgelante è considerata rapida. Sia il cloruro di sodio che il cloruro di calcio, provocano in egual misura la corrosione dei ferri di armatura, ma il cloruro di calcio reagisce con la calce Ca(OH)₂, già presente nel calcestruzzo, con la formazione di un ossicloruro di calcio idrato:</p> $3CaCl_2 + Ca(OH)_2 + H_2O \rightarrow 3CaO \cdot CaCl_2 \cdot 15H_2O.$ <p>Il prodotto di reazione (ossicloruro di calcio idrato) produce la disintegrazione della pasta che avvolge gli aggregati con formazioni di fessurazioni e delaminazioni.</p> <p>Il cloruro di sodio NaCl, invece interagisce con il calcestruzzo in maniera, poiché è in grado di innescare la cosiddetta reazione alcali aggregati in presenza di inerti costituiti da silice amorfa o scarsamente cristallina.</p> |
| <p>Attacco magnesiacio</p> | <p>L'attacco chimico del solfato di magnesio, (ma anche quello del cloruro di magnesio) contenuto in discrete quantità nell'acqua di mare e nei più diffusi fertilizzanti utilizzati in agricoltura, è notevolmente dannoso poiché, a differenza degli altri solfati, reagisce con tutti i costituenti del cemento idrato, compresi i silicati determinando la decalcificazione del calcestruzzo. Con l'idrossido di calcio si hanno le seguenti reazioni:</p> $Ca(OH)_2 + MgSO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + Mg(OH)_2;$ $Ca(OH)_2 + MgCl_2 \rightarrow CaCl_2 + Mg(OH)_2.$ <p>Nella prima reazione si forma gesso il quale reagisce con gli alluminati idrati di calcio dando l'ettringite; in tutte e due i processi invece l'idrossido di calcio viene trasformato in un alto composto solido, Mg(OH)₂ o brucite, meno solubile del Ca(OH)₂, ma con poteri leganti inferiori a quelli della calce.</p> <p>Lo ione Mg⁺⁺ può arrivare anche a sostituirsi al calcio nei silicati idrati di calcio con formazione di un silicato idrato di magnesio (M-S-H) privo delle proprietà leganti dei silicati idrati di calcio e che inoltre può essere facilmente asportato dal movimento delle acque.</p> |
| <p>Dose-risposta</p> | |
| <p>Dta la complessità delle azioni di degrado che può subire il calcestruzzo non ci sono relazioni dose-risposta che leghino in maniera semplice e diretta il degrado con l'azione degli inquinanti e dei fenomeni atmosferici.</p> | |

| Interventi conservativi: principali operazioni manutentive | |
|--|---|
| 1) Trattamenti per l'arresto dell'ossidazione delle armature metalliche | 02.P85.T10-12 Applicazione di legante inibitore di corrosione, per impedire ulteriore ossidazione dell'armatura di acciaio e garantire l'ancoraggio di riporti di malta cementizia; Trattamento dei ferri d'armatura ammalorati comprese eventuali parti cementizie in aderenza e/o intercluse, in elementi in cemento armato, con prodotto inibitore di corrosione o convertitore, atto a garantire l'ancoraggio di riporti in malta cementizia. |
| 2) Operazioni di risanamento | 02.P85.T15 Risanamento e ripristino di parti mancanti di calcestruzzo eseguito con malta premiscelata fibrorinforzata, classe R3, resine sintetiche e inerti |
| 3) Operazioni di isolamento | 02.P85.T35-40 Applicazione di intonaco idrofugo per pareti in calcestruzzo umido; Rivestimento con guaina elastica per impermeabilizzazioni, a base di elastomeri sintetici, con allungamento a rottura oltre il 100%, traspirante e in grado di sopportare le microfessurazioni |
| 4) Operazioni di consolidamento | 02.P85.T50-60 Trattamento impregnante di profondità a protezione antidegrado e impermeabilizzante, costituito da silicato di sodio, per il miglioramento di caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche del calcestruzzo (durezza, compattezza e impermeabilità); Trattamento su calcestruzzo stagionato, di rivestimento cementizio autoadesivo, elastico e a basso spessore, con caratteristiche meccaniche di resistenza alla compressione e all'abrasione, adatto anche per uso esterno esposto a traffico veicolare, resistente ai cicli di gelo-disgelo. |
| Bibliografia | |
| <p><i>Meteorological Parameters and Pollution Caused by Sulfur Dioxide and Their Influence on Construction Materials and Heritage</i>, Ljubisa Preradovic, Predrag Ilic, Svetlana Markovic and Zoran Janjus, FACTA UNIVERSITATIS (NIS) SER.: ELEC. ENERG. vol. 24, no. 1, April 2011</p> <p>E. Pecchioni, F. Fratini, E. Cantisani, <i>Le malte antiche e moderne tra tradizione e innovazione</i>, Bologna 2008</p> <p>S. Pulga, <i>La conservazione delle strutture archeologiche: storia, problematiche e materiali</i>, Verona 2008</p> <p>V. A. Rossetti, <i>Il Calcestruzzo, Materiali e Tecnologia</i>, McGraw&Hill, 2007, pag. 235 - 277</p> <p>C. Feiffer, <i>La conservazione delle superfici intonacate</i>, Milano 2000</p> <p>L. Coppola, <i>Durabilità del calcestruzzo: teoria, pratica e prescrizioni di capitolato - Parte I: cause di degrado di tipo fisico e meccanico</i>, in <i>Industria Italiana del cemento</i> n. 675 del 1993</p> <p>M. Collepari, <i>Durabilità del calcestruzzo: teoria, pratica e prescrizioni di capitolato - Parte I: cause di degrado di tipo chimico</i>, in <i>Industria Italiana del cemento</i> n. 671 del 1992</p> <p>M. Collepari, <i>L'azione dell'acqua del mare sul calcestruzzo armato</i>, Giornate A.I.C.A.P. 1981</p> <p>Prezzario: Prezzario Regione Piemonte 2018 nella sezione 2) Recupero edilizio</p> | |

INTONACO

| <i>Caratteristiche del materiale</i> | |
|--------------------------------------|---|
| Tipologia | Materiale lapideo artificiale |
| Composizione | Varia nella natura, dimensione e proporzione dei componenti |
| Impiego | Utilizzato come strato protettivo e isolante di rivestimento delle murature; come supporto per dipinti murali , graffiti, affreschi; per la modellazione di rilievi in stucco , cornici o come strato di allettamento di altri apparati decorativi. |
| Morfologia | <p>Gli strati degli intonaci possono avere differenti denominazioni (Racc. NorMal, 36/92, 1992), pertanto sono numerati a partire dallo strato più interno:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Strato di ancoraggio e/o di regolazione superficiale (<i>rinzaffo</i>): di granulometria grossolana, atta all'aggrappo dello strato successivo, è utile alla regolarizzazione delle irregolarità della muratura. 2. Strato di livellamento o di corpo (<i>arriccio</i> o <i>arenino</i>): intonaco di grana media, di spessore omogeneo. 3. Strato di finitura (<i>intonachino</i> o <i>velo</i>): livello più liscio, plastico, di grana fine e adeguato a supportare una decorazione pittorica. |
| Descrizione | <p>L'intonaco è il prodotto dell'indurimento di un impasto di materiali diversi che influiscono sulle sue caratteristiche generali. L'impasto iniziale idrato prende il nome di malta, che viene definita in base al tipo di legante impiegato:</p> <ul style="list-style-type: none"> - malta di calce aerea (calcica o magnesiaca) - malta di calce idraulica - malta cementizia - malta gessosa - malta composta o bastarda (che contiene due o più tipi di leganti diversi) |
| Componenti | <p>Oltre al legante sono presenti gli aggregati, che possono essere di tipo inerte o idraulicizzante ed eventuali additivi.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sono inerti tutti gli aggregati che non influiscono sui processi di indurimento del legante, ma svolgono una funzione di controllo del ritiro oltre a evidenti proprietà meccaniche: sabbie silicee o calcaree, di cava o di fiume. - Sono aggregati idraulicizzanti quei materiali naturali o artificiali che conferiscono idraulicità alla malta, permettendo al legante aereo di indurire anche in presenza di acqua e conferendo maggiore resistenza all'intonaco in presenza di elevata umidità/acqua libera: pozzolana, cocciopesto (polvere di mattoni), <i>machefer</i> (prodotto solido residuo della fusione di minerali ferrosi) ... - Gli additivi sono materiali di varia natura atti a conferire proprietà specifiche all'impasto: sangue di bue, latte cagliato, |

| | |
|--|--|
| | albume, colla animale, cera, caseina , resine naturali o sintetiche... |
| Rapporti fra i componenti | <p>In relazione al rapporto legante/aggregato, le malte si distinguono in:</p> <ul style="list-style-type: none"> - malte magre o povere, dove il legante non è sufficiente a riempire i vuoti fra i granuli degli inerti, che hanno maggiore porosità percentuale e pertanto sono più traspiranti (definite anche malte macroporose), ma anche più decoese; - le malte grasse si hanno quando il legante riempie i vuoti dell'inerte in maniera leggermente superiore al dovuto; - le malte ricche o malte forti hanno un notevole quantitativo di legante rispetto all'inerte, sono resistenti ma si fessurano durante il ritiro della fase di indurimento, compromettendone la resistenza nel tempo. |
| Malte con specifiche prestazioni | <p>Nel moderno ambito del restauro e della ristrutturazione, sono stati impiegati intonaci con specifiche proprietà, date dalla formulazione industriale di prodotti premiscelati:</p> <ul style="list-style-type: none"> - le malte termoisolanti impediscono la diffusione del calore e dell'irraggiamento attraverso le murature mediante l'impiego di sostanze aeranti che conferiscono all'intonaco una porosità chiusa; - malte resistenti al fuoco; - malte fonoassorbenti; - malte impermeabilizzanti, additivate con polimeri e prive di porosità (N.B. L'impiego di queste malte dev'essere stabilito con molta attenzione, in quanto potrebbe impedire anche l'uscita dell'umidità già presente nelle murature storiche, causando un'evaporazione forzata sulle pareti interne); - le malte deumidificanti esaltano la traspirabilità dell'intonaco, sono caratterizzate da una grande percentuale di porosità aperta (macroporose) e necessitano di uno spessore minimo di 25 mm per il corretto funzionamento: di fatti queste accelerano il rilascio di acqua dalle murature ma non ne contrastano l'assorbimento e la risalita capillare. |
| Fenomenologia generale del degrado | |
| <p>L'intonaco è un sistema traspirante, che tende sempre a stabilizzarsi con l'ambiente circostante. La sua capacità di assorbimento e rilascio di acqua dipende dalla quantità di pori presenti nella matrice, dalla loro conformazione (porosità aperta o chiusa) e dalla dimensione (che favorisce gli effetti di risalita capillare o la diffusione di Knudsen). Pertanto eventi meteorologici violenti e repentini sono causa di forti stress nella struttura della malta: è maggiore lo stress causato da un temporale eccezionalmente violento e seguito da forti venti caldi che quello di un continuo ma stabile stato di elevata umidità relativa.</p> <p>Per la sua conformazione "a strati", l'intonaco possiede di per sé delle soluzioni di continuità. Per natura sono quindi presenti significative differenze in merito alla velocità/capacità di assorbimento o rilascio dell'acqua tra gli strati d'intonaco o tra questi e il supporto murario, che in casi di gravi infiltrazioni causano distacchi tra i livelli.</p> <p>Le infiltrazioni d'acqua sono anche responsabili della solubilizzazione di sali provenienti dalla muratura, dal terreno, dal tetto o da passati interventi manutentivi in gesso o cemento: la ricristallizzazione di detti sali causa delle microfessure nella matrice, aumentandone la porosità e rendendola più sensibile ad altri fattori di degrado, fino a comprometterne l'integrità materica.</p> <p>Gli inquinanti atmosferici (PM₁₀ e SO₂) sono ritenuti i responsabili dei processi di annerimento ed erosione che interessano le superfici degli intonaci esposti all'aria. L'annerimento avviene per semplice deposizione del particolato</p> | |

| | |
|--|--|
| <p>sulle superfici (generalmente ruvide) d'intonaco e nei pori più esterni. L'erosione, invece, può avvenire solo in presenza di acqua o vapore acqueo, per mezzo di processi chimici che hanno luogo negli stessi pori. A causa della minore coesione degli intonaci, rispetto ad altri materiali lapidei, le croste nere sono più raramente osservabili su queste superfici: la loro caduta a scapito di cedimenti del substrato "intonaco" avviene in tempi molto più brevi, ma non senza erosione.</p> <p>L'esposizione alle precipitazioni e correnti eoliche e le oscillazioni termiche nel periodo successivo alle precipitazioni e intorno a 0° C sono i principali fattori ambientali di degrado.</p> | |
| Fattori di degrado degli intonaci antichi (non cementizi) | |
| Fattori interni di degrado nelle malte a legante tradizionale | <p>Premesso che la maggior parte dei fenomeni di degrado si esplicano in presenza di acqua allo stato liquido o gassoso, è evidente quanto la porosità del materiale giochi un ruolo fondamentale. Quantità e tipologia dei pori dipendono da:</p> <ul style="list-style-type: none"> - quantità di acqua nell'impasto; - rapporto legante/aggregato; - tipo di legante; - tipo di aggregato; - modalità di posa in opera e stagionatura. |
| Fattori esterni (ambientali) di degrado nelle malte a legante tradizionale | <ul style="list-style-type: none"> - risalita capillare; - dilavamento; - cicli di gelo-disgelo; - correnti eoliche; - infiltrazioni d'acqua; - deposito di agenti inquinanti (NO_x, SO₂, PM₁₀...); - elevata umidità; - piogge acide; - deposito di polveri e ossidi metallici; - tensioni di tipo strutturale nella muratura; - colonizzazione biologica. |
| Cause di microfratturazione | <ul style="list-style-type: none"> - rapporto legante/inerte troppo elevato (fessure da ritiro); - acqua di impasto troppo elevata (fessure da ritiro, porosità capillare); - idratazione e carbonatazione di grumi di calce o <i>bottaccioli</i>; - aggregato e/o substrato molto poroso, con elevata capacità di assorbimento dell'acqua e bagnato non a sufficienza (aumento dei fenomeni da ritiro); - tensioni di tipo strutturale nella muratura; - crescita degli apparati radicali di infestanti vegetali superiori. |
| Cause di decoesione/disgregazione | <ul style="list-style-type: none"> - impasto troppo magro; - cattiva adesione fra legante e aggregato (granuli lisci e compatti o ricoperti da minerali argillosi); - cristallizzazione salina superficiale di sali provenienti dall'aggregato (solfuri, solfati, cloruri), dal legante, dagli elementi lapidei della muratura, dalle fondazioni o da stuccature di precedenti interventi conservativi o di adeguamento, portati in |

| | |
|---|---|
| | <p>soluzione dall'umidità di risalita o dalla pioggia battente;</p> <ul style="list-style-type: none"> - solubilizzazione del legante carbonatico per eccessiva imbibizione e dilavamento degli intonaci o per conversione del carbonato di calcio in solfato di calcio (maggiormente solubile) in presenza di inquinanti solfurei, con contestuale formazione di croste nere; - fenomeni di dedolomitizzazione delle calce idrauliche composte da dolomite che, a contatto con il silicato idrato di calcio del legante, si separa con formazione di silicato di calcio, gel di silice e ossido di magnesio. Per assorbimento d'acqua da parte del gel di silice e dell'ossido di Mg con trasformazione in idrossido, si verifica un'espansione del materiale; |
| Cause di deadesione e distacco dal supporto | <ul style="list-style-type: none"> - substrato molto poroso con elevata capacità di assorbimento dell'acqua e/o supporto non sufficientemente bagnato (difetto di presa); - substrato troppo compatto e liscio; - impregnazione d'acqua e/o repentini cambi di umidità (per vento o irraggiamento solare) che infieriscono sulle soluzioni di continuità tra gli strati con differente coefficiente di assorbimento e rilascio dell'acqua assorbita. |
| Cause di alveolizzazione | <ul style="list-style-type: none"> - movimento dell'acqua all'interno del substrato; - solubilizzazione e ricristallizzazione di sali solubili all'interno delle porosità; - dilavamento; - correnti eoliche, con conseguente evaporazione violenta. |
| Cause delle croste nere | <ul style="list-style-type: none"> - deposito di agenti inquinanti (NO_x, SO₂, PM₁₀); - conversione del carbonato di calcio in solfato di calcio in presenza di inquinanti solfurei e umidità o piogge acide; - assenza di dilavamento o manutenzione ordinaria. |
| Cause della scagliatura | <ul style="list-style-type: none"> - solubilizzazione e ricristallizzazione di sali solubili sotto la superficie dell'intonaco; - correnti eoliche, con conseguente evaporazione violenta. |
| Dose-risposta | |
| Warkiss, Eyre, Holland, Rabl, Short (2000) | <p><u>Arenaria calcarea o malta non riparata</u></p> $ML = 7.3 + 1.56.TOW.SO_2 + 0.12.H^+$ <p><i>TOW</i> = fraction of time relative humidity exceeds 80% and temperature >0°C</p> <p><i>SO₂</i> = sulphur dioxide concentration, $\mu g/m^3$</p> <p><i>H⁺</i> = acidity, $meq/m^2/year$</p> |
| Interventi conservativi: principali operazioni manutentive | |
| 1) Operazioni preliminari | 055010-14 Rimozione dei depositi superficiali, Applicazione di bendaggi di sostegno e Puntellatura provvisoria. |
| 2) Operazioni di consolidamento | 055015-6 Ristabilimento della coesione degli intonaci mediante impregnazione di silicato di etile o resine acriliche in |

| | |
|--|--|
| | soluzione, emulsione o microemulsione. |
| | 055017-28 Ristabilimento dell'adesione tra supporto murario e intonaco o tra intonaco e intonachino mediante iniezioni di adesivi riempitivi o malte liquide anche previo Distacco e ricollocamento di piccole parti. |
| 3) Operazioni di disinfezione o disinfestazione | 055029-32 Disinfestazione mediante applicazione di biocida e rimozione meccanica della vegetazione superiore o di colonie di microrganismi autotrofi o/e eterotrofi |
| 4) Operazioni di pulitura | 055033-36 Rimozione di depositi superficiali coerenti , macchie, incrostazioni, concrezioni o fissativi, sali o croste nere mediante applicazione di compresse di sali inorganici e/o lavaggi con acqua e successiva rimozione meccanica. |
| 5) Rimozione di stuccature o elementi inidonei | 055037-40 Rimozione meccanica di stuccature o elementi metallici e Trattamento per l'arresto dell'ossidazione degli elementi metallici. |
| 6) Operazioni di stuccatura, reintegrazione e protezione superficiale | 055041 Stuccatura di fessurazioni, fratturazioni, bordi e cadute degli strati d'intonaco, inclusi i saggi per la composizione della malta idonea per colore e granulometria. |
| | 055043-44 Tinteggiatura di intonaci a calce e/o velatura ad effetto antichizzato. |
| | 055045 Protezione superficiale mediante applicazione di prodotto protettivo a base di resine acriliche in soluzione o di polisilossano. |

Bibliografia

- R. A. Livingston, *Acid rain attack on outdoor sculpture in perspective*, Atmospheric Environment 146 (2016) p. 332-345
- Meteorological Parameters and Pollution Caused by Sulfur Dioxide and Their Influence on Construction Materials and Heritage*, Ljubisa Preradovic, Predrag Ilic, Svetlana Markovic and Zoran Janjus, FACTA UNIVERSITATIS (NIS) SER.: ELEC. ENERG. vol. 24, no. 1, April 2011
- E. Pecchioni, F. Fratini, E. Cantisani, *Le malte antiche e moderne tra tradizione e innovazione*, Bologna 2008
- S. Pulga, *La conservazione delle strutture archeologiche: storia, problematiche e materiali*, Verona 2008
- C. Feiffer, *La conservazione delle superfici intonacate*, Milano 2000
- P. Watkiss, N. Eyre, M. Holland, A. Rabl, N. Short, *Impacts of air pollution on building materials*, Draft, 1 Sept. 2000
- Tesi di laurea: *Studio interdisciplinare finalizzato al restauro della Fontana d'Ercole presso i giardini della Reggia di Venaria Reale*, A. Carlone, Tesi di Laurea Magistrale, UniTo 2012-2013
- [Prezzario](#): Restauro dei beni artistici ARI, DEI 2016

LATERIZIO

| <i>Caratteristiche del materiale</i> | |
|--------------------------------------|--|
| Tipologia | Materiale lapideo artificiale |
| Composizione | Mescolanza di minerali argillosi e composti accessori |
| Impiego | <p>In edilizia:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Camini e canne fumarie; • Coperture: tegole, coppi o marsigliesi; • Murature: elementi che vengono usati per la realizzazione di murature portanti, e possono essere in mattoni pieni o semiforati; • Divisori: pareti di tamponamento in mattoni forati; • Faccia a vista: il mattone faccia a vista viene utilizzato soprattutto per la finitura esterna delle pareti. Hanno vari aspetti, in forma e colori, e possono essere classificati in base al metodo di realizzazione (in "estrusi", "pasta molle" o "pressati") e all'eventuale trattamento di superficie. Al di là del mattone si utilizzano faccia vista anche altri tipi di elementi laterizi più moderni (paramano), spesso staccati dalla parete a formare una facciata ventilata; • Pavimenti in cotto a piastelle o mattoni, mentre altre forme sono usate per scale, battiscopa o particolari arredi urbani; • Solai; • Tavelle e Tavelloni: sono laterizi piani forati e di forma parallelepipedo, con basso spessore e con pareti e setti sottili (tra 6 e 8 cm) che le rendono leggere, maneggevoli e piuttosto resistenti a flessione. Sono elementi versatili e variamente utilizzati. <p>Il laterizio può essere utilizzato anche in polvere o grani come additivo idraulicizzante delle malte, con il nome di cocciopesto.</p> |
| Morfologia | Ceramica a pasta porosa ottenuta da argille impure, cotte a temperature inferiori a 1000 °C o comunque al di sotto della temperatura di sinterizzazione e vetrificazione. Porosa, assorbe l'umidità, viene scalfita da una lama d'acciaio e ha una frattura granulosa. Sono: laterizi, terrecotte, maioliche e terraglie. |
| Componenti | <p>Argilla composta da diversi minerali: caolinite, hallosite, montmorillonite, illite... e composti accessori (minerali di ferro + 2 e + 3, quarzo, carbonato di calcio e magnesio, solfato di calcio, solfato idrato di gesso, fosfati, nitrati, miche, sostanze organiche, bitume, etc.). Qualità e quantità dei componenti permettono di costituire un largo numero di argille con uso e aspetto differenti.</p> <p>I mattoni storici, anche in funzione dell'area e dei metodi di produzione, possono contenere svariati composti accessori che ne inficiano le caratteristiche prestazionali.</p> |

| | |
|---------------------------|---|
| <p>Descrizione</p> | <p>A seconda dell'aspetto e delle caratteristiche assunte dopo la cottura, i laterizi si suddividono in:</p> <ul style="list-style-type: none"> • albasì: di colore chiaro, insufficientemente cotti, di scarsa resistenza meccanica e chimica; • mezzani: laterizi ben cotti che raggiungono un carico di rottura alla compressione di 150 kg/cm² asciutti e di 135 kg/cm²; • forti: ben cotti che raggiungono un carico di rottura alla compressione di 180 kg/cm² asciutti e di 160 kg/cm²; • ferrioli: laterizi di colore scuro, troppo cotti, che presentano un inizio di scorificazione; hanno buone caratteristiche meccaniche, ma non sono porosi e sono spesso più o meno deformati. La carenza di porosità fa sì che essi abbiano maggiori resistenze meccaniche, ma che aderiscano difficilmente alla malta cementizia una volta che sono messi in opera. Arrivati ad altissime temperature, stanno per "rifondersi", e possono assumere anche il colore verde. <p><u>La cottura influenza sempre il coefficiente di assorbimento del prodotto finito.</u></p> |
|---------------------------|---|

Fenomenologia generale del degrado

Il degrado del laterizio avviene, come per i materiali lapidei, prevalentemente attraverso **processi chimico-fisici**, riconducibili alle caratteristiche di composizione chimica, porosità e struttura interna del materiale.

Tra i **difetti intrinseci** del materiale, che possono condurre a specifici degradi, sono da annoverare la presenza di **impurità** nell'impasto e le modalità di cottura.

La natura dell'impasto influenza non solo la colorazione e l'aspetto, ma anche il deterioramento del mattone: la presenza di **sali alcalini** provoca la formazione di **efflorescenze e subflorescenze** e ha effetto sulla durezza del materiale; mentre il **carbonato di calcio** può trasformarsi, con la cottura, in monossido di calcio (CO) di solito raccolto in noduli di pochi millimetri di diametro. Questi noduli, se sottoposti a idratazione, aumentano di volume e innescano tensionamenti tali da determinare la fratturazione del laterizio, prima o dopo la posa in opera del materiale (similmente a come avviene coi *bottaccioli* nel caso degli intonaci).

La modalità di **cottura** contribuisce a definire la **resistenza** meccanica, la **porosità**, il **colore** e l'**aspetto** del mattone. Esiste una relazione tra temperatura e durata della cottura con il contenuto di solfati: quest'ultimo risulta essere maggiore nei mattoni meno cotti. Temperature di cottura elevate comportano la formazione di laterizi con porosità minore e maggiore resistenza a compressione. Una **cottura differenziata** dei componenti dell'impasto determina, nella resistenza e nella natura stessa del materiale, caratteristiche particolari in diverso modo catalizzatrici dell'alterazione.

Il principale fattore esterno di degrado è l'**acqua**, in grado di decomporre i **sali** contenuti nel mattone. La cottura dell'argilla, infatti, produce silicati e allumosilicati che cementano i granuli di quarzo e gli altri detriti dell'impasto argilloso. L'acqua penetrata nel mattone porta alla graduale decomposizione di questi sali che liberano ossidi di calcio e ossidi alcalini.

Gli ossidi di calcio, in presenza di umidità, si carbonatano e ripristinano la calcite, mentre gli ossidi alcalini formano dei carbonati solubili. Quando l'acqua ristagna, i carbonati solubili vengono veicolati dall'acqua in fase di evaporazione (accelerata dalle correnti eoliche e dall'irraggiamento solare) fino alla superficie; qui si depositano cristallizzando e formano l'efflorescenza. La progressiva solubilizzazione dei sali costituenti il materiale e della loro ricristallizzazione nei pori superficiali porta a fenomeni di decoesione, disgregazione, alveolizzazione e scagliatura del laterizio.

Gli stessi fenomeni di alveolizzazione e distacco sono alimentati dai fenomeni di gelo-disgelo in condizioni di forte umidità, mentre l'attacco acido non sembra costituire un fattore di degrado.

Nello scenario umido, si verificano anche gravi distacchi ove i laterizi sono accoppiati a materiali (come la malta o il cemento) con coefficienti di assorbimento e rilascio dell'acqua assorbita molto differenti.

| | |
|---|--|
| <p>Gli inquinanti atmosferici (PM₁₀ e SO₂) sono ritenuti i responsabili dei processi di annerimento ed erosione dei laterizi esposti all'aria (croste nere). L'annerimento avviene per semplice deposizione del particolato sulle superfici ruvide e nei pori più esterni. L'erosione, invece, può avvenire solo in presenza di acqua o vapore acqueo, per mezzo di processi chimici che hanno luogo negli stessi pori.</p> <p>La tipologia di alterazione dei mattoni è quindi in gran parte riconducibile a quella della pietra porosa e degli intonaci; allo stesso modo la porosità e la capacità di ritenzione idrica del laterizio rappresentano un substrato ideale per la crescita di patine biologiche.</p> <p>Naturalmente, l'intervento che garantisce la migliore conservazione di un paramento murario in laterizio è l'intonacatura: l'intonaco è in grado di mediare gli scambi con l'ambiente esterno e funge da strato di sacrificio.</p> | |
| Fattori di degrado | |
| Fattori interni di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - errori nel processo di formazione; - errori nel processo di cottura; - difetti intrinseci del materiale per composizione o natura dei componenti (sali alcalini: carbonato di calcio...); - accoppiamento con materiali differenti. |
| Fattori esterni (ambientali) di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - precipitazioni, infiltrazioni d'acqua, umidità; - cicli di gelo-disgelo; - correnti eoliche; - irraggiamento solare; - PM₁₀ e SO₂ |
| Dose-risposta | |
| Non sono state rinvenute in bibliografia relazioni dose-risposta per quanto concerne questo materiale | |
| Interventi conservativi: principali operazioni manutentive | |
| 1) Operazioni preliminari | 025021-26 Rimozione dei depositi superficiali, Applicazione di bendaggi di sostegno e Puntellatura provvisoria. |
| 2) Operazioni di consolidamento | 025027-30 Ristabilimento della coesione mediante impregnazione di silicato di etile fino a rifiuto |
| | 025031-32,35 Ristabilimento strutturale e consolidamento di fessurazione via iniezione di malte |
| | 025033-34 Riconfigurazione di porzioni di paramento murario e Ristabilimento della resistenza meccanica mediante ancoraggio con barre in acciaio ad aderenza migliorata |
| 3) Operazioni di disinfezione o disinfezione | 025036-38 Disinfestazione mediante applicazione di biocida e rimozione meccanica della vegetazione superiore o di colonie di microrganismi autotrofi o/e eterotrofi |
| 4) Operazioni di pulitura | 025040-45 Rimozione di depositi superficiali coerenti , macchie, incrostazioni, concrezioni o fissativi, sali o croste nere con impianto di nebulizzazione, idrosabbatura o mediante applicazione di compresse di sali inorganici e/o lavaggi con acqua e successiva rimozione meccanica. |
| 5) Rimozione di stuccature o elementi inidonei | 025047-60 Rimozione meccanica di stuccature, piccoli tratti di paramento antico o elementi metallici e Trattamento per l'arresto dell'ossidazione degli elementi metallici. |

| | |
|---|--|
| 6) Operazioni di stuccatura, reintegrazione e protezione superficiale | 025065-67 Risarcitura o Riconfigurazione di porzioni di paramento con materiali analoghi o con imitazione in malta |
| | 025068-69 Sigillatura di buche puntaie e Progettazione di sistemi di allontanamento volatili |
| | 025070-77 Revisione cromatica Protezione superficiale mediante applicazione di prodotto protettivo o scialbo |
| Bibliografia | |
| <p>T. Yates, <i>Mechanisms of air pollution damage to brick, concrete and mortar</i>, in The Effects of Air Pollution on the Built Environment, Air Pollution Reviews, 2003, pp. 107-132</p> <p>P. Giacalone, F. Laner, A. Pala, <i>Murature a faccia vista, patologie e rimedi</i>, Franco Angeli Editore, Milano, 1997</p> <p>G. Carbonara, <i>Trattato di restauro architettonico</i>, voll. II e III, UTET, Torino, 1996</p> <p>C. Quaglierini, L. Amorosi, <i>Chimica e tecnologia dei materiali per l'arte</i>, Bologna 1991</p> <p>G. Baronio, L. Binda, <i>Studio sull'alterazione delle murature in laterizio</i>, in 'L'edilizia e l'industrializzazione', 1989</p> <p>Tesi di laurea: <i>Studio interdisciplinare finalizzato al restauro della Fontana d'Ercole presso i giardini della Reggia di Venaria Reale</i>, A. Carlone, Tesi di Laurea Magistrale, UniTo 2012-2013</p> <p>Prezzario: Restauro dei beni artistici ARI, DEI 2016</p> | |

VETRO

| <i>Caratteristiche del materiale</i> | |
|--------------------------------------|--|
| Tipologia | Materiale solido amorfo artificiale |
| Composizione | Ossido di silicio SiO ₂ combinato con sostanze aggiuntive. <u>Questa scheda analizza il vetro artificiale.</u> |
| Impiego | Utilizzato in edilizia per la costruzione di infissi (finestre, vetrate...) o nell'ambito artistico (vetrate dipinte: "vetro cattedrale", vetro soffiato...). |
| Morfologia | Solido amorfo (non cristallino), duro, trasparente (non per le frequenze dell'ultravioletto inferiori ai 400 nm se è addizionato con soda) e fragile. |
| Descrizione | <p>Formato fin dal III millennio a.C. in Mesopotamia sotto forma di paste vitree, la cultura del vetro ha origini antichissime e un lungo susseguirsi di affinamenti tecnici e compositivi del suo impasto. Ad oggi, si è in grado di produrre anche molti vetri speciali:</p> <ul style="list-style-type: none"> • vetro cristallo (o semplicemente cristallo) in silice è un vetro con aggiunta fino al 35% di piombo; duro, brillante; con aggiunta di potassio si ha il cristallo di Boemia. È ampiamente utilizzato per oggetti artistici; • vetro satinato: ottenuto per via chimica con acidi; • vetro acidato: dall'aspetto ruvido, ottenuto per corrosione con acido fluoridrico; • specchio: ottenuto per argentatura in tempi antichi, oggi più comunemente con alluminio; • vetro autopulente: trova impiego nella costruzione degli edifici, automobili e altre applicazioni tecniche. Uno strato di 50 nm di biossido di titanio applicato sulla superficie esterna produce l'effetto autopulente attraverso l'effetto fotocatalitico (i raggi ultravioletti catalizzano la decomposizione delle molecole organiche sulla superficie della finestra) e l'idrofilicità (l'acqua viene attratta dalla superficie del vetro, dove forma un sottile strato che "lava via" i residui dei composti organici); • vetro camera: una struttura vetrata utilizzata nei serramenti e facciate continue, per aumentare le prestazioni di isolamento termico e acustico. È costituita da due o più lastre di vetro piano unite tra di loro, al perimetro, da un telaio distanziatore in materiale metallico profilato (alluminio, acciaio o polimerico) e separate tra di loro da uno strato d'aria o di gas (argon, kripton o xenon). Il telaio perimetrale è conformato in modo che all'interno possano trovare alloggio dei sali che sono necessari per mantenere disidratata la lama d'aria risultante, evitando in questo modo la comparsa di condensa sulla superficie delle lastre rivolta verso l'intercapedine. • Vetro basso-emissivo: su cui è stata posata una pellicola (<i>couche</i>) di ossidi metallici, che ne migliora notevolmente le prestazioni di isolamento termico senza modificarne sostanzialmente le prestazioni di trasmissione della luce; |

| | |
|--------------------------|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> • vetro solare e vetro selettivo: creati per scopi simili al basso-emissivo ma funzionali ai climi caldi, per il controllo delle radiazioni solari. |
| <p>Componenti</p> | <p>Le sostanze aggiunte al vetro possono essere classificate in base alla loro funzione:</p> <ul style="list-style-type: none"> • fondenti: abbassano la temperatura di fusione e migliorano la fluidità del vetro durante la sua produzione (soda Na_2CO_3 e potassa K_2CO_3 o borati e nitrati nell'industria vetraria); • stabilizzanti: migliorano le proprietà chimiche e meccaniche del vetro prodotto (ossidi di calcio, bario, magnesio e zinco); • affinanti: agevolano l'eliminazione di difetti (triossido d'arsenico, nitrati alcalini e nitrati d'ammonio); • coloranti: modificano l'aspetto cromatico del vetro prodotto (ossidi di ferro, rame, cromo e cobalto); • decoloranti: neutralizzano il colore impartito da altre sostanze (biossido di manganese); • opacizzanti: per la produzione del <i>vetro opalino</i> (fosfati di sodio, cloruri di sodio, fosfati di calcio, cloruri di calcio, ossido di stagno e talco) <p>Altre sostanze possono essere aggiunte per ottenere diverse proprietà. A seconda dell'azione sul reticolo cristallino, gli ossidi aggiunti nei vetri possono essere classificati in:</p> <ul style="list-style-type: none"> • ossidi formatori di reticolo: ossido di silicio, ossido di boro e ossido di fosforo • ossidi modificatori di reticolo: ossidi di metalli monovalenti e bivalenti (tra cui: sodio, potassio, calcio e magnesio) • ossidi intermediari: ossido di alluminio e ossido di piombo. |
| <p>Additivi</p> | <p>Il vetro al piombo (<i>cristallo</i> o vetro Flint) si ottiene aggiungendo ossido di piombo, sotto forma di litargirio giallo (PbO) o minio rosso (Pb_3O_4), ed ha un indice di rifrazione maggiore di quello del vetro comune, con l'effetto di apparire più brillante.</p> <p>Aggiunte di carbonato di bario (BaCO_3) aumentano ugualmente l'indice di rifrazione del vetro, mentre aggiunte di ossido di torio producono un elevatissimo indice di rifrazione e i vetri così ottenuti sono usati per produrre lenti di alta qualità.</p> <p>Il boro è aggiunto sotto forma di borace ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$) o acido borico ($\text{H}_3\text{BO}_3$) per migliorare le caratteristiche termiche ed elettriche (come nel caso del vetro Pyrex).</p> <p>L'aggiunta di alte quantità di ferro provoca l'assorbimento della radiazione infrarossa, come nei filtri per l'assorbimento di calore nei proiettori cinematografici. Con il cerio si ottiene un forte assorbimento delle radiazioni ultraviolette, ottenendo vetri in grado di offrire protezione dalle radiazioni ultraviolette ionizzanti.</p> <p>Metalli e ossidi metallici vengono aggiunti nella produzione del vetro per dare o alterare il colore. Il manganese in piccole</p> |

quantità neutralizza il verde causato dalla presenza di ferro, mentre in quantità elevate dà il colore ametista. Similmente il **selenio** in piccole dosi è usato per decolorare, mentre in quantità elevate dona colore rosso. Piccole concentrazioni di **cobalto** (0,025-0,1%) danno colore blu. Ossido di **stagno** con ossidi di **arsenico** e **antimonio** danno un vetro bianco opaco, usato nei laboratori di Venezia per imitare la porcellana.

Aggiunte dal 2 al 3% di ossido di **rame** producono un colore turchese, mentre il rame metallico dà un rosso opaco, e viene impiegato come surrogato del rubino rosso. Il **nichel**, dipendentemente dalla concentrazione, induce blu, violetto o anche nero. L'aggiunta di **titanio** dà un vetro giallo-marrone. L'**oro** in concentrazioni minime (0,001%) produce un vivace colore rosso rubino, mentre una quantità ancora minore dà sfumature meno intense di rosso, commercializzate con il nome di "vetro cranberry".

Fenomenologia generale del degrado

I fenomeni principali di alterazione si manifestano, nella maggior parte dei casi, in presenza di un vetro con una instabile composizione chimica, più aggredibile dagli agenti atmosferici. Fattori di degrado sono i fenomeni di dilavamento, gli attacchi di microrganismi, le vibrazioni e inadeguati interventi di restauro.

In determinati casi di instabilità chimica della materia vetrosa l'acqua, sotto forma di precipitazioni, umidità e condensa presente nell'atmosfera, può essere un agente di deterioramento del vetro e nel caso specifico delle vetrature, questi fenomeni possono verificarsi sia internamente che esternamente al pannello.

La combinazione dell'acqua con elementi derivati dall'inquinamento, in particolare il biossido di zolfo, è responsabile di molti tipi di degrado, in quanto produce soluzioni corrosive e può formare dei depositi. Gli effetti di questi elementi dipendono inoltre da fattori come il tempo di esposizione agli agenti atmosferici (che può essere continuo o ciclico) e la temperatura. Possiamo individuare tre stadi di questo tipo di degrado. Inizialmente è l'acqua che, attaccando il vetro, produce idrossidi; segue la conversione degli idrossidi in carbonati dovuta all'anidride carbonica presente nell'atmosfera; infine, per l'azione degli elementi inquinanti e in particolare dell'anidride solforosa (SO₂), avviene la conversione dei carbonati in solfati.

Gli effetti del deterioramento possono variare in base al tipo di vetro e alla sua superficie; il vetro corroso dall'azione dell'acqua presenta una microporosità che permette agli agenti inquinanti di penetrare in profondità ed estendere l'azione corrosiva. Il fenomeno può iniziare in aree limitate per poi propagarsi su tutta la superficie della vetratura. La corrosione sembra generalmente partire dalle parti più esterne delle tessere vitree, in quanto l'umidità viene catturata meglio nell'interstizio esistente tra listello di piombo e vetro.

La formazione di una pellicola uniforme di gesso sembra essere il primo stadio della **corrosione** dei vetri, ma questo processo varia a seconda della composizione del vetro.

Il vetro durevole, ricco di silicio e calcio regge meglio all'attacco atmosferico. Il vetro povero di silice, ma ricco di potassio si copre con una crosta di singenite [K₂Ca(SO₄)₂+H₂O]. Il vetro la cui composizione è una media tra questi due tipi si corrode uniformemente, con dei microcrateri in superficie. In questo caso si forma la crosta composta di gesso. I vetri calcio-potassici, diffusi in Italia soprattutto in Toscana e Umbria, erano fabbricati con ceneri di felce, quercia e faggio, ricche di potassio. Vetri più stabili erano quelli che venivano prodotti a Venezia, dove come fondente veniva impiegata la cenere di piante locali ricche di sodio. I prodotti di corrosione che ricoprono la superficie del vetro, costituiti da solfati molto igroscopici, provocano a loro volta una ritenzione di umidità. La quantità di umidità trattenuta da questi prodotti dipende direttamente dall'umidità relativa dell'atmosfera e può raggiungere 5mg/cm² quando l'umidità relativa sale a 90%. Questi prodotti perciò favoriscono e accelerano la decomposizione delle vetrature, essendo l'acqua uno degli agenti più corrosivi.

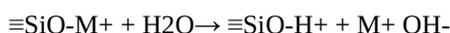
Un eccessivo contenuto di alcali all'interno del vetro può portare a fenomeni di crizzling durante la liscivazione: la tessera vitrea sviluppa sulla sua superficie uno strato idratato scivoloso, il vetro diventa completamente opaco e delle particelle si distaccano dalla superficie.

Una volta iniziato il processo di corrosione, gli ioni calcio vengono estratti dal reticolato disgregato e formano dei sali

solubili igroscopici che ricristallizzano nelle microfrazioni propagandosi così nel vetro. Il vetro è costituito da una struttura di atomi di ossigeno in cui la rigidità proviene dalla forza dei legami con gli atomi di piccole dimensioni che sono i "formatori". Gli atomi estranei o "modificatori" si introducono nei vuoti di questo edificio. Tutte le proprietà del vetro dipendono essenzialmente dal rapporto modificatori/formatori: si può semplificare affermando che la resistenza del vetro a tutte le sollecitazioni meccaniche, termiche o chimiche, decresce se questo aumenta.

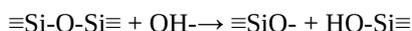
Il carattere dell'alterazione del vetro è strettamente legato al pH della soluzione e si può dividere in attacco idrolitico e corrosione.

L'**attacco idrolitico o lisciviazione** del vetro è un processo di scambio ionico tra gli alcali del vetro (Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) e i protoni dell'acqua, secondo la seguente reazione:



Questo meccanismo si verifica in condizioni di pH < 9 (i detergenti alcalini devono essere evitati) e interessa lo strato superficiale del vetro, causando un impoverimento in alcali e un relativo arricchimento in silice (strato di silice idrata).

La **corrosione** avviene quando i vetri sono posti a contatto con soluzioni a pH fortemente basico (pH > 9), il meccanismo di alterazione prevalente è la corrosione, che causa la disgregazione del reticolo vetroso, rompendo il legami silicio-ossigeno [1-5] secondo la seguente reazione:



Nel caso di vetri esposti all'atmosfera, gli ioni alcalini e alcalino terrosi estratti dal vetro mediante *leaching* possono reagire con i gas presenti (CO₂, SO_x, NO_x) per formare i rispettivi sali e, se la soluzione alcalina formatasi non è eliminata, il processo diviene simile alla lisciviazione.

La velocità di diffusione è indipendente dal pH del mezzo fino ad un valore di circa 9, e corrisponde ad una diminuzione della nascita degli alcalini e ad un aumento della nascita della silice. In una soluzione in cui il pH è vicino a 9, la velocità di deterioramento del reticolato silicio cresce quando il pH aumenta. Quando un vetro è attaccato dall'acqua non ci sono fasi di equilibrio dal momento che i diversi componenti non passano in soluzione nelle stesse proporzioni rispetto a come sono presenti nel vetro. La silice continua a passare in soluzione fino a che sono presenti ioni alcalini e, quando tutti gli alcalini sono scomparsi, il fenomeno si arresta.

Se i prodotti di attacco sono portati via da un passaggio costante d'acqua, la reazione produce un gel di silicio idratato, denominato "strato idratato" che grazie al suo spessore ritarda la velocità di attacco. La formazione di uno strato ricco di silice sulla superficie dei vetri alterati può essere considerata come protettiva che, in assenza di innalzamenti di pH funziona da barriera contro un'ulteriore corrosione, a meno che condensazioni e successive evaporazioni del vapor acqueo presente non determinino una concentrazione di sali alla superficie ed un conseguente aumento della alcalinità.

All'interno di una stessa vetrata si assiste spesso a una maggiore o minore resistenza alla corrosione dei vetri di diverso colore. Ciò è dovuto alla diversa reazione che i componenti della materia vetrosa hanno rispetto alla aggressione chimica.

Nelle vetrate i fenomeni di corrosione aumentano lungo i fili di piombo per fuoriuscita dello stucco dall'interstizio piombo-vetro e per condensa dovuta alla buona conducibilità di calore da parte del piombo.

Fattori di degrado

| | |
|---|---|
| <p>Fattori interni di degrado</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Composizione e rapporto fra i componenti (silicio, calcio, potassio); - eccesso nel contenuto di alcali. |
| <p>Fattori esterni (ambientali) di degrado</p> | <p>Cause fisiche esterne:</p> <ul style="list-style-type: none"> - umidità; - condensa (cicli di condensa e di evaporazione causano meno danni che un'esposizione continua all'umidità); - dilavamento (un vantaggio del dilavamento è che i prodotti alcalini dovuti alla corrosione sono trascinati via e la corrosione sarà ridotta); - Irraggiamento solare (può causare solarizzazione, con |

| | |
|--|--|
| | <p>conseguente alterazione cromatica delle vetrate in rosa-violetto o marrone);</p> <ul style="list-style-type: none"> - Vento (danni meccanici) <p>Cause chimiche esterne:</p> <ul style="list-style-type: none"> - SO_x - CO₂ - NO_x - PM₁₀ <p>Cause biologiche:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Attacco biologico da parte di microrganismi che si insediano in difetti o porosità del vetro, che preferiscono l'esposizione al nord, poco vento e irraggiamento solare e fotosintetizzano (l'aumento di anidride carbonica potrebbe agevolare lo sviluppo). Metabolizzano ferro e manganese con produzione di sostanze basiche che accelerano il degrado del substrato, unitamente ad un'azione disgregante meccanica. <p>Cause meccaniche:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pressione (vento) - Deformazione delle piombature - Urti |
| Dose-risposta | |
| <p>Christodoulakis, Tzanis, Varotsos, Ferm, Tidblad (2016)</p> | <p><u>Modern glass</u> $H = \{0.2212[SO_2] + 0.1367[NO_2] + 0.1092PM_{10}\} / [1+(382/t)^{1.86}]$</p> <p><u>Modern glass from Athens</u> $H = \{0.204[SO_2] + 0.016[NO_2] + 0.319PM_{10}\} / [1+(382/t)^{1.86}]$</p> <p>H = haze, % [SO₂] = annual average concentration, μg m⁻³ [NO₂] = annual average concentration, μg m⁻³ [PM₁₀] = annual average concentration, μg m⁻³ t = exposure time, days</p> |
| Interventi conservativi: principali operazioni manutentive | |
| <p>Per il restauro di manufatti storici/artistici in vetro purtroppo non è presente un prezzario di riferimento, pertanto i costi possono essere valutati da un restauratore specializzato attraverso l'analisi dei costi dei materiali e dei tempi d'impiego. Le operazioni conservative e ricostruttive inerenti a tali manufatti sono semplificabili come di seguito:</p> | |
| <p>1) Operazioni di pulitura</p> | <p>Rimozione dei depositi coerenti, incoerenti e dei prodotti di corrosione con pennellesse, soluzioni acquose anche additivate di tensioattivi molto diluiti o miscele di solventi.</p> |
| <p>2) Operazioni di consolidamento e protezione</p> | <p>Consolidamento con resine acriliche e protezione delle superfici esposte al degrado con diverse tecnologia (es. ioni alluminio per inibire la liscivazione)</p> |
| <p>3) Rimontaggio e incollaggio definitivo</p> | <p>Rimontaggio con strisce di nastro adesivo di carta e piccole grappe in metallo. Conseguente incollaggio con resine acriliche.</p> |
| <p>4) Ricostruzione</p> | <p>Integrazione delle parti mancanti con ricostruzioni in resina eventualmente pigmentata per accordarsi con l'originale, applicata per colatura in controforme in silicone o cera, debitamente sigillate</p> |

per evitare la fuoriuscita di materiale, eccetto che per le cannuce di iniezione; ed eventuale rifinitura della stuccatura.

Bibliografia

J. Christodoulakis, C. G. Tzanis, C. A. Varotsos, M. Ferm, J. Tidblad, *Impacts of air pollution and climate on materials in Athens, Greece*, Atmos. Chem. Phys. Discuss.196, 2016

V. Kontozova-Deutsch, F. Deutsch, R. H.M. Godoi, R. Van Grieken, K. De Wael, *Urban air pollutants and their micro effects on medieval stained glass windows*, in Microchemical Journal 99 (2011), pp. 508-513

F. Licenziati, R. Falcone, E. F. Orsega, M. Verità, *Studio preliminare sulla produzione e il degrado di vetri potassici e sodici come modelli di vetrate artistiche di vetri industriali in ambiente confinato*, Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro, 2010, 3, pp. 7-17

Chopin M.-H., Verità M., Falcone R., Lehuédé P., Vallotto M., Nardone M., Sodo A., *Soda-lime- silica glass containers: chemical durability and weathering products*, Advanced Materials Research, 2008, 39-40, pp. 305-310

Kontozova V., Godoi R. H. M., Spolnik Z., Worobiec A., Deutsch F., Van Grieken R., *Characterization of air pollutants observed in three European cathedrals. Is the protective glazing really effective?*, Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro, 2005, 3, pp. 33-40

S. Ferrucci, *Conservazione e restauro del vetro*, in VETRO E CERAMICA- Altare -IV Scuola Nazionale di Chimica per i Beni Culturali, 2002

Verità M., Marabelli M., Santopadre P., *Studio conservativo della vetrata absidale del Duomo di Orvieto*, Bolletino ICR, 2000, 1, pp. 63-85

J. Ryan, *Chemical stabilization of weathered glass surface*, in: V & A conservation Journal, n.16 1995, pp. 6-9

Barbara Appelbaum, *Guide to Environmental Protection of Collections*, Sound View Press, 1991

| <i>Caratteristiche del materiale</i> | |
|---|--|
| Tipologia | Materiale organico artificiale |
| Composizione | <p>I termini polimero (macromolecola, catena di monomeri), materia plastica (derivante dal greco <i>plastikos</i> che significa atto a prendere forma o ad essere stampato) e resina sono spesso utilizzati come sinonimi .</p> <p>Un polimero è un materiale (polimerico) puro, non additivato. Viene in genere considerato come nome della famiglia a cui fa riferimento una classe di materiali (polietilene PE, polipropilene PP, ...), ma i polimeri (puri) sono raramente utilizzati come tali. I termini (materia) plastica o resina si usano quando sono presenti additivi).</p> <p>In generale, rivestimenti e prodotti vernicianti vengono protetti dall'azione dei processi di degradazione mediante sistemi stabilizzanti, cioè additivi capaci di rallentare o inibire i processi di degradazione.</p> <p>La complessità dei processi di degrado è dovuta all'azione spesso combinata di più agenti: analogamente, la scelta di stabilizzanti efficaci è condizionata dalla conoscenza dettagliata dei meccanismi delle reazioni chimico-fisiche che si vogliono ostacolare.</p> |
| Impiego | <p>Oltre che in edilizia, dove vengono impiegati per serramenti, impiantistica, rivestimenti, tubature, isolanti termici ed acustici, i materiali polimerici trovano un vastissimo impiego: laminati, arredamento, oggettistica, componenti di elettrodomestici, apparecchiature elettroniche, abbigliamento, adesivi e vernici.</p> <p>Trovano impiego anche nel campo dei beni culturali dagli anni Sessanta, con notevoli problemi conservativi.</p> <p>Allo stesso tempo, i polimeri sono largamente usati nel restauro come adesivi e consolidanti, con formulazioni in continua evoluzione. Pertanto, il loro invecchiamento è tutt'oggi in corso di studio.</p> |
| <i>Fenomenologia generale del degrado</i> | |
| <p>I processi di degradazione portano a un progressivo deterioramento delle proprietà meccaniche, ottiche, chimiche del materiale il cui comportamento dipenderà ovviamente dalla sua struttura chimica e morfologica e dal tipo di agenti degradativi interessati.</p> <p>Gli indicatori di degradazione che possiamo osservare nei polimeri sono:</p> <p>meccanici: variazione delle proprietà di massa o di superficie in funzione del tempo di degradazione;</p> <p>chimici: sviluppo di composti inerti;</p> <p>visivi-ottici: ingiallimento (“yellowing”), sbiancamento (“bleaching”) per usura, “whitening” (per sforzo meccanico), variazione di assorbimento ai raggi ultravioletti.</p> <p>La durabilità di un polimero e la sua resistenza agli agenti atmosferici determinano se è adatto per applicazioni di costruzione esterna e quali famiglie di additivi devono essere incorporate nella sua formulazione.</p> <p>La resistenza agli agenti atmosferici dipende dal tipo di polimero, dalla sua composizione e struttura e dall'effetto sinergico delle condizioni di esposizione. Sebbene ogni componente del clima influenzi il polimero esposto ad esso, il</p> | |

problema più grave degli agenti atmosferici è l'effetto sinergico di questi componenti.

I primi segni di cambiamenti dovuti al clima appaiono sulla superficie del materiale, ma con un'esposizione continua queste alterazioni penetrano nello spessore del materiale. Questi cambiamenti possono riguardare il **colore** della superficie, la formazione progressiva di **crepe**, una diminuzione della **trasparenza**, delle **bolle**, lievi cambiamenti nella **forma** o nelle **dimensioni**, o cambiamenti nelle **proprietà meccaniche o elettriche** o nella **solubilità**. Il corso di questi cambiamenti caratterizza ogni polimero e la sua stabilità perché non è possibile inibire completamente la degradazione causata dal tempo, ma la durata di un materiale polimerico può essere prolungata per mezzo di stabilizzatori di processo, pigmentazione e stabilizzatori della luce.

In effetti, la tendenza generale all'aumento dell'uso di polimeri in applicazioni esterne è derivata dall'introduzione di un'ampia varietà di tipi di polimeri, con miscele complesse di polimeri di base e vari additivi, per fornire la stabilità richiesta delle proprietà in tutte le applicazioni, ovvero la durata.

Le **radiazioni UV** solari influiscono negativamente sulle proprietà dei materiali organici utilizzati nelle costruzioni, come la plastica e il legno. Le durate di servizio all'aperto dei materiali polimerici sono influenzate dai loro tassi di degrado sotto la radiazione UV solare, nonché da altri fattori climatici come temperatura, umidità e inquinanti atmosferici. Mentre è atteso il recupero dello strato di ozono stratosferico, è ancora probabile che si verifichino aumenti locali delle radiazioni UV, soprattutto nei tropici, a causa degli effetti dei cambiamenti climatici. Tali aumenti, se associati a un innalzamento della temperatura ambiente, possono ridurre significativamente la durata dei materiali da costruzione organici.

Diverse tecnologie comprovate, incluso l'uso di stabilizzatori UV, trattamenti superficiali o rivestimenti, sono state sviluppate nel corso degli anni per mitigare questi effetti avversi; ma mentre queste tecnologie dovrebbero essere in grado di compensare eventuali scenari realistici di radiazioni UV e cambiamenti climatici futuri, ne aumenteranno anche in modo significativo il costo.

La tendenza attuale verso materiali più sostenibili dal punto di vista ambientale nell'edilizia, potrebbe richiedere la graduale eliminazione di alcuni additivi convenzionali (come gli stabilizzanti) utilizzati nella plastica, nonché la sostituzione con altri materiali. Il focus di questa valutazione è sui recenti progressi nella comprensione dei meccanismi di degrado indotto dalle radiazioni UV nei materiali e nella valutazione delle tecnologie emergenti per la loro stabilizzazione contro questo degrado.

Fattori di degrado

| | |
|--|---|
| Fattori interni di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - mancanza o insufficienza di additivi stabilizzanti; - difetti di colaggio/stampaggio/stesura. |
| Fattori esterni (ambientali) di degrado | <ul style="list-style-type: none"> - O₂, O₃, PM₁₀, SO_x e ambienti acidi in generale (a seconda del polimero) - radiazioni UV; - radiazioni ad alta energia; - temperature elevate o troppo basse e sbalzi tra esse; - umidità/precipitazioni; - cicli di gelo-disgelo; - colonizzazione biologica. |

Dose-risposta

| | |
|------------------------------------|---|
| Brimblecombe, Grossi (2010) | <p><u>Gomma</u></p> $1 / tc = re + kO_3 O_3$ <p>$1 / tc$ = reciproco del tempo per la prima comparsa di crepe. Il parametro kO_3 è una costante di velocità e O_3 è la concentrazione di ozono in ppb. I valori re e kO_3 dipendono entrambi dal tipo di gomma e dal fatto che la formazione di crepe sia considerata ai bordi o meno.</p> |
| Kucera (2004) | <u>Acciaio galvanizzato rivestito con melammina alchidica</u> |

$$L = [5/(0.084[SO_2] + 0.01Rh + f(T) + 0.00082Rain)]^{1/0.43}$$

$$f(T) = 0.040(T-10) \text{ when } T \leq 10^\circ\text{C, otherwise } -0.064(T-10)$$

r^2 0.73 N 138

Pannelli in acciaio con resine alchidiche

$$L = [5/(0.033[SO_2] + 0.013Rh + f(T) + 0.0013Rain)]^{1/0.41}$$

$$f(T) = 0.040(T-10) \text{ when } T \leq 10^\circ\text{C, otherwise } -0.064(T-10)$$

r^2 0.68 N 139

L = maintenance interval (life time), *year*

Rh = relative humidity, % - annual average

T = temperature, $^\circ\text{C}$ - annual average

$[SO_2]$ = concentration, $\mu\text{g m}^{-3}$ - annual average

$Rain$ = amount of precipitation, m year^{-1} - annual average

r^2 = coefficiente di correlazione

N = numero di siti coinvolti nell'analisi

Interventi conservativi: principali operazioni manutentive

La manutenzione dei polimeri non ha un prezario di riferimento: nel campo dell'edilizia e impiantistica le per le parti ammalorate è prevista la sostituzione.

Nel campo dei beni artistici, la loro conservazione è ancora in fase di studio, con la sintetizzazione di prodotti sempre più stabili e prestanti e pertanto il costo dei singoli interventi dev'essere stimato *a progetto*.

Bibliografia

Brucker et al.: "Scienza e tecnologia dei materiali polimerici" III ed., Edises, Napoli 2016

P. Brimblecombe, C. M. Grossi, *Potential Damage to Modern Building Materials from 21st Century Air Pollution*, NOAA's ARK, 2010

A. Russo, *La plastica come nuovo materiale dell'arte contemporanea, storia, proprieta' chimico-fisiche, degrado, conservazione e restauro*, in VII Congresso Nazionale IGIIC – Lo Stato dell'Arte – Napoli, 8-10 Ottobre 2009

Chiantore, Rava, Dell'Aquila, *Conservare l'arte contemporanea : problemi, metodi, materiali, ricerche*, Milano 2005

International Co-operative Programme on Effects on Materials, includig Historic and Cultural Monuments UNECE, 2004, a cura di V.Kucera (ICP Materials Coordination Centre, Sweden)