

LA SCIENZA DELLE VETRINE

ANALISI DEI RISCHI
DELLA CONSERVAZIONE



Il volume è stato realizzato con il contributo di:



Consiglio Nazionale delle Ricerche



Dipartimento di Scienze Umani e Sociali, Beni Culturali



Istituto per la Conservazione e Valorizzazione dei Beni Culturali



Istituto per le Tecnologie Applicate ai Beni Culturali



Istituto di Storia del Mediterraneo Antico



Goppion SpA

©CNR Edizioni
P.le Aldo Moro 7
00185 Roma
www.edizioni.cnr.it

ISBN 978 88 8080

Finito di stampare nel mese di ottobre 2016 in Roma
dalla So.co.me. snc

La scienza delle vetrine

Analisi dei rischi della conservazione

a cura di Marco Realini

@ CNR Edizioni

La scienza delle vetrine – Analisi dei rischi della conservazione

A cura di Marco Realini

Indice

Prefazione Pozzo

Introduzione Pinna

I musei e i sistemi espositivi: dalla tradizione artistica all'innovazione tecnologica
(Gigliarelli ITABC)

I materiali esposti nelle vetrine (ICVBC – Sansonetti)

Il controllo del microclima (ICVBC – Riminesi)

L'illuminazione D'Eredità ISMA

La chimica nelle vetrine (Bonaduce, Colombini, Lancaster, Tickett)

La stabilità delle vetrine D'Eredità ISMA

Prefazione
Riccardo Pozzo

«Il concetto, l'organizzazione e il funzionamento dei musei sono categorie completamente da innovare per rispondere adeguatamente all'attuale domanda sociale di fruizione delle risorse culturali»¹.

Così recita la descrizione del quinto sottoprogetto, «Museologia e museografia», del *Progetto Finalizzato CNR per i Beni Culturali* approvato dal CIPE il 28 giugno 1995 con un finanziamento di 115 miliardi di lire per il quinquennio 1996-2000. Non a caso, dunque, il presente volume curato da Marco Realini nasce nel quadro della collaborazione strategica tra il CNR e il Laboratorio Museotecnico Goppion Spa, siglata dall'accordo di ricerca congiunta del 14 ottobre 2013 per l'analisi dei rischi connessi alla conservazione del patrimonio in ambiente espositivo. Ogni contributo dà conto dello stato dell'arte, nella convinzione che il corretto progetto di una vetrina da museo debba partire dai dati scientifici che assicurano la conservazione del patrimonio stesso.

«Innovazione sociale e culturale» è un sintagma divenuto di uso corrente negli ultimi anni per via del nome scelto dallo European Strategy Forum Research Infrastructures per il gruppo di lavoro che si occupa delle infrastrutture per le scienze umane e sociali². In sé e per sé, l'innovazione significa creazione di nuovi prodotti e servizi che portano sul mercato una nuova idea. Oggi si è d'accordo che la ricerca di base sia sì *curiosity driven*, ma abbia al contempo un impatto traslazionale, poiché è il trasferimento di conoscenze a rendere possibile l'innovazione, che è *product driven*, in quanto genera nuovi prodotti e linee di produzione. L'innovazione è competenza dei consigli delle ricerche di tutto il mondo, che sono assai diversi dalle università e dalle accademie, che risalgono al Medioevo e le accademie al Rinascimento. Le università hanno come missione l'insegnamento e i professori sono però liberi di insegnare e fare ricerca su cosa piace loro di più; mentre le accademie furono istituite dai re che volevano che degli scienziati vivessero a corte averli per avere risposte su questioni di loro, dei re, interesse. I consigli delle ricerche, invece, furono istituiti attorno alla prima guerra mondiale per ottenere risultati di rilevanza strategica per i loro paesi.

Le scienze umane e sociali si studiano al CNR da poco più di mezzo secolo, dalla riforma degli enti di ricerca firmata dal romanista Riccardo Orestano, *Decreto Legge 2 marzo 1963, n. 283*.

¹ CNR, *Progetto finalizzato Beni Culturali*, con un'introduzione di Angelo Guarino, Presidente del Comitato Scienza e Tecnologia Beni Culturali, CNR, Roma, 1995.

² <http://www.esfri.eu/working-groups/social-and-cultural-innovation>: «The Social and Cultural Innovation Strategic Working Group proposes possible solutions (related to RIs) that are able to help tackle the Grand Challenges facing society, such as health or demographic change, or the “Inclusive, innovative and secure societies” challenge from the third pillar of Horizon 2020, called “Tackling societal challenges”. It establishes possible methods through which social sciences and humanities could be used as an evaluation criterion for the activity of other RIs in the ESFRI roadmap (e.g. social impact, etc.). It also explores how RIs can contribute to social innovation or better knowledge transfer towards society».

Da quel momento il CNR ha reso possibile una travolgente evoluzione del contesto scientifico delle scienze umane e sociali, che ha messo capo a importanti scoperte tecnologiche, un esempio per tutti sono le biblioteche digitali, che al CNR sono attive dal 1964, e ad altrettanto importanti applicazioni industriali, e qui l'esempio da fare riguarda l'evoluzione delle tecniche di restauro degli artefatti con la quale il CNR permise al paese di reagire con efficacia ai disastri provocati al patrimonio culturale dall'alluvione di Firenze del 1966. Importa sottolineare che al centro di queste ricerche è stato l'oggetto sociale, materiale o immateriale, ma sempre posto da una persona, cosa che richiede oggi un ripensamento rispetto agli sviluppi della tecnologia. Non si tratta di verificare se le macchine funzionino, si tratta di vedere invece quali siano le domande che l'essere umano pone nel suo cammino sulla *via humanitatis*.

La conoscenza, la conservazione e la fruizione del patrimonio non solo sono funzionali alle politiche d'integrazione, ma promuovono anche la crescita culturale, economica e sociale. Si pensi alla conoscenza e alla conservazione di contesti culturali e di artefatti, all'archeologia post-bellica, alla realtà virtuale e alla museografia sostenibile³, l'impatto delle quali dà come risultati: a) rendere il patrimonio culturale lo strumento per azioni di diplomazia scientifica e culturale; b) proteggere e promuovere la diversità culturale; c) documentare, conservare, monitorare, fruire il patrimonio, e infine e) proteggerlo da minacce ambientale e antropiche nel Medio Oriente e nel Nord Africa. La *Milan Declaration on Culture as an Instrument of Dialogue among Peoples* adottata all'unanimità dai ministri della cultura di ottanta paesi a conclusione della conferenza internazionale del 31 luglio-4 agosto 2015 organizzata dal MiBACT in Expo2015 a Milano afferma che:

«Cultural Heritage is the mirror of history, civilization and of the society, which is expected to protect it. Cultural Heritage, both tangible and intangible, is also the essence of identity, the memory of peoples and their past and present civilizations. It expresses, at the same time, universally recognized values of tolerance, dialogue, and mutual understanding...the work of man and his extraordinary talent must be protected and preserved for the benefit of future generations»⁴.

A Bruxelles, l'approccio strategico alla diplomazia culturale ha fatto valere la diversità culturale come parte integrante dei valori dell'Unione Europea. La *Joint Communication to the European Parliament and the Council: Towards an EU Strategy for International Cultural Relations* (8 giugno 2016) dell'Alto rappresentante dell'Unione per gli affari esteri e la politica di sicurezza indica i seguenti cinque principi guida:

³ Ad esempio, satelliti e tecniche topografiche, droni e sensori per la protezione del patrimonio in spazi ampi; distemi diagnostici avanzati; nano-materiali e nano-tecnologie per la conservazione; 3D per l'aumento dell'accesso cognitivo in contesti storici e archeologici; metodologie e protocolli per presentazioni 3D in contesti a rischio; monitoraggio dell'interazione tra artefatti e contesti; sistemi espositivi avanzati: vetrine intelligenti.

⁴ http://www.unesco.org/new/en/media-services/single-view/news/culture_is_the_identity_card_of_ones_people_declares_prime_minister_matteo_renzi_to_culture_ministers_gathered_at_expo_milan_2015/#.V7AsG46tTr4.

«(a) Promote cultural diversity and respect for human rights. (b) Foster mutual respect and intercultural dialogue. (c) Ensure respect for complementarity and subsidiarity. (d) Encourage a cross-cutting approach to culture. (e) Promote culture through existing frameworks for cooperation»⁵.

L'attuale crisi dei migranti e dei rifugiati ha chiarito con terrificante efficacia quanto sia urgente per le amministrazioni locali, regionali, nazionali e internazionali metter mano a politiche di innovazione sociale e culturale a vantaggio dei nuovi cittadini, per accoglierli con piena dignità.

La grande sfida è il passaggio dalla *data science* alle *data humanities*. L'Unione Europea ha riconosciuto la necessità di fornire strutture avanzate per ricerca di frontiera sull'innovazione sociale e culturale. L'obiettivo principale è considerare gli aspetti scientifici e tecnologici del settore, offrendo soluzioni innovative alle sfide sociali del nuovo millennio. Di fatto, peraltro, anche i ricercatori delle scienze umane e sociali sono confrontati ogni giorno con masse enormi di dati e con una crescente complessità in contesti altamente interdisciplinari. Pensiamo a tecnologie abilitanti quali:

«NFC-Near Field Communication; CRM-Content Rights Management; contents-aware networks (fruition and enjoyment); low-latency networks (warning and security); and huge-bandwidth networks (augmented reality)».

L'obiettivo del volume curato da Marco Realini è mettere a disposizione di lettori, esperti, e tecnici le precondizioni per realizzare soluzioni avanzate per museografia sostenibile e sistemi espositivi. Al momento, sei infrastrutture di ricerca per «Social and Cultural Innovation» sono pronte e funzionanti e tra queste, E-RIHS (European Research Infrastructure for Heritage Science), che crea sinergie per un approccio multidisciplinare all'interpretazione, conservazione, documentazione e management del patrimonio culturale⁶. Il volume è un contributo di sostanza e qualità per la realizzazione del grande progetto italiano di guidare la ricerca europea per la scienza del patrimonio culturale.

⁵ http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-16-2075_it.htm.

⁶ <http://www.iperionch.eu/-/launching-e-rihs-european-research-infrastructur-for-heritage-science-a-new-way-of-approaching-heritage-science>. Le sei infrastrutture di ricerca del settore «Social and Cultural Innovation» sono competenza delle tre aree strategiche del Dipartimento Scienze Umane e Sociali, Patrimonio Culturale del CNR. La prima area strategica, *Innovazione nella società*, abbraccia CESSDA ERIC, ESS ERIC, SHARE ERIC assieme alle azioni *Science with and for Society*. La seconda, *La mente umana e la sua complessità* abbraccia SHARE ERIC e presenta competenze utili per la costruzione dello Human Technopole a Milano. La terza, *Innovazione per la cultura*, abbraccia CLARIN ERIC, DARIAH ERIC e E-RIHS.

I musei fra conservazione e comunicazione

I due compiti fondamentali di ogni museo sono garantire la conservazione del patrimonio culturale e comunicare alla comunità il significato di tale patrimonio attraverso i mezzi di comunicazione a sua disposizione, primo fra tutti l'esposizione al pubblico.

Tuttavia, considerate nell'ambito dell'istituzione museale, conservazione e esposizione sono due azioni potenzialmente in contrasto fra loro. Infatti la ricerca di una buona conservazione del patrimonio che si richiede a un museo implica la limitazione dell'azione espositiva (sino all'optimum di conservazione che si raggiungerebbe con la chiusura totale al pubblico), e viceversa un'ampia e completa esposizione al pubblico, che è alla base dell'azione culturale del museo, limita l'efficacia dell'azione conservativa. Il compito principale della museologia e della museografia (cui le tecniche di conservazione fanno parte) è perciò quello di coniugare conservazione e esposizione in modo da ottenere la massima tutela del patrimonio e garantire al tempo stesso la massima fruizione pubblica (ovvero la massima valorizzazione del patrimonio per usare il termine ministeriale).

Nel museo la conservazione del patrimonio e la comunicazione del suo significato sono quindi azioni che devono procedere parallelamente; esse devono ambedue obbedire a condizioni che sono strettamente legate sia alla tipologia delle collezioni, sia all'ambiente naturale, culturale e sociale che circonda e che esprime il museo.

I parametri che il museo deve rispettare per garantire la conservazione sono diversi da quelli che il museo deve considerare per ottenere un'efficace azione di comunicazione culturale attraverso le sue esposizioni: mentre infatti la conservazione dipende da fattori fisici (temperatura, umidità, luce, sismicità del territorio, sicurezza dell'edificio e dei corpi espositivi, ecc.), l'esposizione è condizionata da fattori socio-culturali (pressione antropica dell'utenza, frequenza delle modificazioni indette da pressioni politiche, ecc.). Poiché sia i fattori fisici, sia quelli socio-culturali sono diversi in aree geografiche e in situazioni culturali differenti, è chiaro che ogni museo deve studiare ed attuare il sistema di conservazione e lo stile di esposizione che meglio si adattano alla sua situazione ambientale e che permettono di coniugare al meglio queste due azioni. Ciò significa che ogni museo ha problemi di conservazione e di esposizione che gli sono propri e che può condividere solo con musei che condividano anche, almeno in parte, il suo ambiente naturale e sociale. Vale a dire che, nelle grandi linee, per il complesso dei musei non esistono standard di valore universale per la conservazione e per l'esposizione.

Il risultato di tutto ciò è che ogni museo è diverso da ogni altro museo, e che ogni museo deve trovare i propri modelli conservativi e espositivi. Ciò rende la progettazione dei musei un'operazione complessa, che deve essere affidata a strutture operative che coniughino competenze nel campo della conservazione preventiva e competenze nel settore della comunicazione, e che soprattutto siano consapevoli della necessità di tener conto non solo della natura del patrimonio da conservare ed esporre, ma anche della realtà naturale e sociale in cui il museo si colloca.

Giovanni Pinna

INDICE

I musei e i sistemi espositivi. Dal processo creativo all'innovazione tecnologica.

di Elena Gigliarelli

Introduzione

1. Musei e società. Origine ed evoluzione del museo dalla metà del Settecento a oggi

1.1. La nascita del museo moderno tra Settecento e Ottocento

1.2 Il museo del Novecento. Monumento della città e macchina espositiva

1.3. Il museo a cavallo del XXI secolo tra dimensione urbana, architettura iconica e integrazione nel paesaggio

2. L'allestimento degli spazi espositivi

2.1. La stagione dei grandi maestri del secondo novecento in Italia

2.2. Il design delle vetrine. Evoluzione di un sistema espositivo

2.3. La vetrina: dalla protezione alla conservazione

2.4. La vetrina come strumento di comunicazione

3. Il museo del futuro

3.1 Museo diffuso: l'arte fuori dal museo

3.2 Musei virtuali e spazi immersivi

3.3 Musei e paesaggi culturali

3.4 Museums after Museums

Introduzione

Oggi i musei sono sempre più luoghi pubblici popolari e svolgono un ruolo significativo nella società, oltre a rappresentare la cultura, la storia e il gusto di una comunità, giocano un ruolo attivo nelle sfide di un futuro prossimo venturo. In un'epoca di instabilità e di incertezze il museo ci appare come una macchina del tempo capace di farci viaggiare nella storia per ritrovare le nostre radici e l'identità del presente. Ed è anche un tema urbano quello del museo di oggi, che si muove tra un ambiente costruito e ambiente immateriale, allargando i suoi confini fuori dagli spazi del contenitore architettonico.

Nella prima sezione viene presentato un rapido excursus storico sulla formazione del museo dalla tipologia classica a partire dal Settecento al museo contemporaneo ripercorrendo l'evoluzione dei sistemi espositivi, riportando alcuni casi esemplari di design di vetrine e allestimenti, fino alla complessità dei musei attuali con una breve presentazione di progetti recenti per commentare esempi di successo e integrazione tra esposizione materiale e fisica e comunicazione immateriale e virtuale.

Nella seconda parte viene affrontato il tema degli allestimenti, degli spazi espositivi a partire dai grandi maestri del 900 fino all'evoluzione contemporanea della "funzione espositiva" che allarga il suo ruolo fisico e propone un passaggio verso un "sistema integrato di comunicazione". Una forma di sradicamento che porta ad abitare virtualmente nella rete digitale e allo stesso tempo vivere la dimensione pluridimensionale di spazi complessi. Quando il museo si trasforma da tempio aulico e sacrale, frequentato quasi esclusivamente da esperti e studiosi, a luogo aperto al grande pubblico, le mostre e gli allestimenti espositivi cambiano linguaggio per diventare elementi di forte attrazione.

Il tema delle vetrine viene poi affrontato come elemento fondamentale in un processo di programmazione del museo e nella gestione delle collezioni. Questi aspetti sono esaminati sia riguardo ai problemi di conservazione e protezione, in un bilanciamento tra mantenimento e utilizzo, che in rapporto ai caratteri del design e ai criteri di progettazione dei sistemi espositivi.

Una ulteriore riflessione si sviluppa sul rapporto tra allestimento, museo e utenti, con l'avvento del digitale. Gli ambienti virtuali, emotivamente immersivi, portano verso una ricerca concettuale e realizzativa, verso nuovi sistemi di comunicazione tecnologicamente complessi che "integrano" le varie funzioni del museo. Il museo si avvia a divenire uno spazio vivo, in trasformazione dinamica, nel quale i dispositivi e i linguaggi della multimedialità e dell'interattività sono in grado di agire direttamente sugli spazi fisici attivi, significativi, e rendere anche i sistemi espositivi non solo contenitori di oggetti e collezioni, ma capaci di rappresentare storie d'arte e comunicare emozioni.

E alla fine scorrono alcune riflessioni e prospettive sul museo che verrà, su quali architetture, spazi non confinati, dispositivi di frontiera e scenari saranno possibili per soddisfare nuovi bisogni di cultura, tendenze, nuove opportunità di carriera e per offrire possibilità di business sostenibili che riguarderanno anche l'innovazione nel saper fare.

1. Musei e società. Origine ed evoluzione del museo dalla metà del Settecento a oggi

Il museo moderno nasce come spazio architettonico destinato allo studio, alla raccolta, alla conservazione e alla tutela di oggetti antichi e opere d'arte, che recuperati dal loro luogo di origine o di provenienza non assolvono più alla loro funzione originaria e possono così essere ~~essi~~ portati alla conoscenza di un gran numero di visitatori per esporre i loro caratteri storici e artistici. Come Argan sottolinea i musei con le loro raccolte e collezioni di opere equivalgono, per le arti figurative, a ciò che le biblioteche sono per la letteratura e per le scienze. La storia del collezionismo attraversa già l'antichità classica con musei e *pinacoteche*, come Vitruvio nomina i luoghi dove venivano conservate le opere d'arte. Il medioevo è il tempo della raccolta delle "mirabilia", il rinascimento fiorentino vede la nascita degli Uffizi, per poi arrivare nel Seicento e ancor più nel Settecento all'avvento dell'amatore d'arte, figura tipica di quella borghesia colta che nello spirito del nascente Illuminismo si avvia a creare il museo come istituzione pubblica per la conservazione delle collezioni, ma anche come laboratorio della storia e della conoscenza del mondo. Ed è da questa epoca che il "luogo delle Muse" inizia il suo viaggio verso un destino da protagonista della vita culturale delle società contemporanee, segnando la storia del XX secolo con una straordinaria sequenza di musei archeologici, d'arte, di scienze naturali, nei quali la continua evoluzione della forma, degli spazi architettonici, dei sistemi espositivi prelude a quello che oggi appare non più soltanto un edificio dedicato alla trasmissione del patrimonio storico, artistico o naturalistico, ma piuttosto come un "sistema integrato di comunicazione della cultura" che sempre più si integra se non addirittura si confonde con la città dei nostri tempi.

1.1. La nascita del museo moderno tra Settecento e Ottocento

Nel corso del Settecento avviene il passaggio dal concetto di collezione privata a quello di esposizione museale a carattere pubblico. I caratteri spaziali e figurativi principali dei primi musei aperti al pubblico erano: la presenza di sale di diversa dimensione (come nelle dimore private comparivano la *pinacotheca* vitruviana, i *cabinets* e le *kammern*), la presenza di gallerie (*ambulationes* vitruviane, tema chiaramente ripreso nella Galleria degli Antichi a Sabbioneta di Vincenzo Scamozzi, 1583-90, per le collezioni di proprietà di Vespasiano Gonzaga), il riferimento figurativo e simbolico al tempio laico (pronaio all'ingresso, come nella *Gliptoteca di Monaco di Baviera* di Leo von Klenze, 1816-30, nel British Museum di Londra di Sidney Smirke, 1823-47, nel *Museo Nazionale di Budapest*, Mihály Pollack, 1836-48), la presenza di una rotonda come centralità dell'operare artistico e riferimento alla monumentalità della memoria, anche in relazione al Pantheon romano e alle sale delle muse, come nel *Muséum* di Boullée, nel museo ideale di Jen-Nicolas-Louis Durand, nell'*Altes Museum* di Berlino, nel *Natural History Museum* di Londra di Richard Owen. "L'organizzazione tipologica di un qualsiasi impianto museale diventa a questo punto definibile dalle possibili combinazioni degli spazi a sala, galleria e rotonda attorno a vestiboli e scaloni, secondo partiti compositivi collaudati dalle regole della disciplina compositiva dell'architettura: assialità e simmetrie, sistemi distributivi semplici e basati sull'organizzazione del percorso che segue l'ordinamento espositivo ..per scuole, per epoche, per temi..., messa a punto dei dispositivi tecnici per la conservazione e l'illuminazione naturale delle opere, dove il lucernario è un dispositivo tecnologico squisitamente museale". (Peressut L. B., 1999).

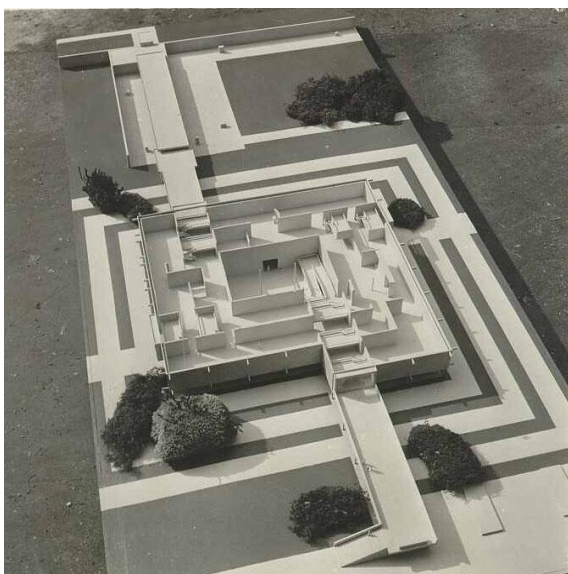
Ai primi dell'Ottocento, Durand propone un modello museale all'interno delle tavole "Précis des leçons d'architecture" che viene direttamente ripreso da Karl Friedrich Schinkel nell'*Altes Museum* di Berlino (1823-30): un sistema di gallerie organizzato intorno ad una rotonda. Durante l'Ottocento il museo diventa l'edificio di cui ogni città doveva dotarsi contribuendo a caratterizzare l'architettura dello spazio urbano pubblico in maniera determinante: la *Gliptoteca* e l'*Alte Pinakothek* progettate da Leo von Klenze (1816-30) furono concepiti con questi criteri, precedendo quello che, con la costruzione dell'*Altes Museum* di Berlino

diede la spinta per la configurazione di un foro museale, il *Museumsinsel*. In questa prospettiva nascono musei gemelli dedicati all'arte e alla natura (Musei d'arte e storia naturale al Palais de Longchamp a Marsiglia e sulla Marie-Theriesenplatz a Vienna), quartieri museali monodisciplinari e pluridisciplinari (*Museumsinsel* a Berlino, South Kensington a Londra e Mall di Washington).

Alla fine dell'Ottocento l'esperienza delle esposizioni universali e l'avanzamento tecnico e tecnologico, contribuiscono a determinare il passaggio dai simbolismi settecenteschi alle sperimentazioni costruttive: ampie aule vetrate, grandi corti centrali, circondate da ballatoi e gallerie aperte, mostrano le potenzialità di nuovi materiali come la ghisa, l'acciaio e il cemento armato. Ampie aule basilicali con soffitto voltato, in ferro e vetro celebrano i valori della contemporaneità e del progresso, facendo riferimento alla tradizione architettonica dei padiglioni, delle fiere e dei palazzi dell'industria. Nascono così musei di storia naturale (*University Museum* a Oxford di Thomas Deane, Benjamin Woodward e John Ruskin, 1855-1860, *Galleria Zoologica* al Jardin des Plantes di Parigi, di Jules André, 1877-81), musei di arte industriale (*Kunstgewerbe Museum* a Berlino, di Martin Gropius e Heino Schmieden, 1877-81, o il *Museo dell'artigianato e dell'industria* a Budapest, di János Lechner, 1896), musei della tecnica (*Royal Scottish Museum* a Edimburgo, di Francis Forke, 1861-88).

1.2. Il museo del Novecento tra monumento della città e macchina espositiva

Nella concezione di nuovi musei, la nascita della museologia e della museografia sposta l'attenzione dalla caratterizzazione del progetto architettonico alle questioni legate ad una maggiore efficienza della struttura museale dal punto di vista della flessibilità, dell'illuminazione e in generale rispetto ad una maggiore attenzione da porre alla valorizzazione delle opere. Durante tutto il novecento la sperimentazione legata a questi temi è sviluppata prevalentemente attraverso il lavoro dei maestri.



1 Le Corbusier, Museo a crescita illimitata, senza luogo
foto © FLC/ADAGP

Con intenti scientifici, didattici e documentari, nel 1929 Le Corbusier progetta il *Musée Mondial* (Ginevra) destinato a far conoscere aspetti di vita naturale e antropica. Il museo ha la configurazione di una sorta di enorme piramide Maya (larga 180 metri e alta 100 metri circa) composta dallo sviluppo a spirale quadrata di una galleria lunga due chilometri e mezzo, divisa in tre fasce parallele corrispondenti ai tre percorsi tematici: le opere, i luoghi, i tempi della storia della terra. Alcuni dei principi introdotti con il progetto precedente vengono sviluppati, a partire dal 1930, nel *Musée a croissance illimitée*, un museo di arte moderna per Parigi, sviluppato poi tra il 1934 e il 1939, configurato a partire da un modulo quadrato di 7

metri di lato, composto da elementi ripetuti e ripetibili in coerenza con i nuovi criteri della flessibilità e dell'ampliabilità, in totale assenza di monumentalità. Il volume è innalzato al di sopra di un piano terra di pilotis e il percorso museale sopraelevato si sviluppa all'interno di una struttura priva di finestre, motivo per cui il museo viene definito come privo di una vera e propria facciata e illuminato dall'alto. Lo spazio interno, ampliabile per parti autonome, è flessibile attraverso lo spostamento di pareti mobili che annullano la classica concezione della galleria espositiva.

Le caratteristiche tipologiche, morfologiche e funzionali di questi due progetti vengono riprese nel *Museo delle arti occidentali di Tokyo* (1954-59), unico museo realizzato di Le Corbusier. Un volume unitario in cemento si caratterizza esternamente per un ingresso rialzato che gli conferisce una dimensione urbana e lucernari in copertura con tagli nei prospetti che portano una luce diffusa all'interno degli ampi spazi interni. Percorsi, scale e ballatoi sono aperti e si affacciano su spazi ampi di diversa ampiezza e altezza dove sono liberamente collocate le opere esposte.

A New York, tra il 1943 e il 1959, Frank Lloyd Wright progetta e realizza il *Solomon R. Guggenheim Museum*, un museo dal carattere fortemente urbano, che riprende la storica spazialità museale della rotonda avvolgendola con rampe-ballatoio aperte sulla hall centrale illuminata dall'alto come un moderno Pantheon. Al piano terra la rotonda assume le caratteristiche di una piazza urbana, mentre il marciapiede esterno sembra estendersi lungo i percorsi perimetrali. Le modalità espositive avvengono attraverso una traslazione del concetto di galleria verso la tipologia della rampa aperta che ospita le opere consentendo di poterle osservare anche dallo spazio centrale in maniera "panoramica".

Sul tema del museo, Ludwig Mies van der Rohe lavora negli stessi anni al progetto del *Museo per una piccola città* (1942): un unico grande spazio definito dal piano di calpestio e dal piano della copertura e delimitato perimetralmente da pareti completamente vetrate che mettono lo spazio interno in diretto contatto con l'esterno. Il paesaggio circostante diventa uno sfondo mutevole per le opere esposte e la loro collocazione diventa un modo per disegnare lo spazio museale.



2 Ludwig Mies van der Rohe,
Neue Nationalgalerie
Foto di milestone

I temi approfonditi verranno realizzati nella *Neue Nationalgalerie* di Berlino, da lui progettata e realizzata tra il 1965 e il 1968. In questo caso, il tema del museo consente anche una sperimentazione sul tema dell'edificio ad aula e spinge la tecnica verso soluzioni che consentano tale volontà progettuale.

Sul tema del museo lavora negli stessi anni anche Alvar Aalto che, prima attraverso il progetto per il museo di Tallin (1937), poi nella realizzazione del *KunstenMuseo d'Arte* di Aalborg in Danimarca (1958) e

successivamente ancora attraverso il progetto per un museo d'arte a Bagdad nel 1958, sviluppa un lavoro sul tema dello sfalsamento di gallerie affiancate, comunicanti e direzionate verso il nucleo centrale dell'edificio con ingresso e servizi. Questo dispositivo tipologico consente di avere una configurazione compiuta dell'allestimento per sezioni definite, ma interconnesse, con un percorso di visita libero ma allo stesso tempo orientato. L'edificio museale è configurato, dal punto di vista volumetrico, attraverso volumi affiancati con differenti altezze che consentono l'ingresso della luce naturale attraverso gli sfalsamenti di altezza e mediante particolari lucernari che accolgono e diffondono la luce proveniente da tagli nella copertura.

Durante il '900 ulteriori sperimentazioni sull'architettura del museo e sull'allestimento museale furono quelle effettuate da Louis Khan, con una particolare cura rivolta alla definizione della sezione di ingresso della luce naturale zenitale negli spazi espositivi interni. Una prima esperienza è sviluppata nel *Kimbell Art Museum* (1966-72), un edificio a C inserito in un grande parco con due corti interne. Il museo è composto dalla giustapposizione di lunghe gallerie espositive caratterizzate da un lavoro di recupero della tradizionale tipologia della copertura voltata a botte, ma in chiave innovativa grazie all'introduzione di lucernari sulla sommità, i quali distribuiscono la luce sulle pareti curve interne della copertura. In questo caso dunque, la questione dell'illuminazione non è un tema tecnico, ma architettonico vero e proprio, che contribuisce a definire la spazialità interna globale del museo.

Nel *Center for British Art dell'Università di Yale* (New Haven, Connecticut, 1972-77) un grande volume monolitico articolato intorno alla presenza di due corti vetrate, è scandito dalla copertura cassettonata disegnata da una trama di lucernari che consente l'ingresso di una luce diffusa all'interno dei grandi spazi interni. La suddivisione di questi ambienti è fortemente connessa con la geometria della trama dei lucernari—e l'allestimento prevede che le opere siano addossate alle pareti in maniera tradizionale.



3. Louis Khan, Kimbell Art Museum
Foto © Liao Yusheng.

1.3. Il museo a cavallo del XXI secolo tra dimensione urbana, architettura iconica e integrazione nel paesaggio.

Dalla fine degli anni Novanta a oggi, il tema museale ha continuato a rivestire un ruolo di prim'ordine rispetto al quadro complessivo della sperimentazione progettuale in campo internazionale, ma più che sulle riflessioni legate all'allestimento museografico, si sono sperimentati processi e dispositivi compositivi inerenti l'architettura complessiva dell'edificio. Per tracciare un quadro sintetico, ma compiuto delle

soluzioni realizzate in questo periodo, si possono individuare alcune delle prospettive sulle quali sono state sviluppate alcune scelte progettuali: la sperimentazione si è concentrata prevalentemente sulla realizzazione di nuovi edifici fortemente rappresentativi per la loro architettura complessiva in termini di ricerca tipologica. Il museo viene inteso come nuovo tempio civico, in termini di presenza iconica, e si realizzano architetture – simbolo e orientate al rapporto con il contesto attraverso la costruzione di nuovi landmark nel paesaggio. Negli ultimissimi anni poi, in concomitanza con le necessità di riutilizzare complessi architettonici dismessi o di lavorare sul tema della densità più che sulla nuova costruzione, la progettazione museale si è confrontata nuovamente con il rapporto antico - nuovo.

Nuovi centri civici.



4. James Stirling, Neue Staatsgalerie, Stoccarda (foto free senza autore)

Alcuni progetti di musei appartenenti a questo periodo presentano caratteristiche che si riferiscono esplicitamente alla dimensione urbana del progetto di architettura: gli spazi della città e la dimensione pubblica diventano i termini di un confronto sviluppato a scala architettonica e con cui alcuni musei si confrontano. Con il progetto della *Neue Staatsgalerie* di Stoccarda (1984), James Stirling conferma il ruolo del museo come edificio pubblico per eccellenza lavorando sulla riproposizione degli elementi del museo classico con gallerie che formano un corpo a U e rotonda centrale, utilizzando un vocabolario moderno. L'edificio è percorribile trasversalmente con la possibilità di connettere due zone distinte della città poste a quote differenti e di entrare in maniera integrata all'interno del sistema dei percorsi urbani pubblici.

Il *Bonnenfanten Museum* di Aldo Rossi (1992-95) è impostato su un impianto planimetrico a pettine aperto verso il fiume che lambisce Maastricht e culminante in un landmark a torre. Tra i corpi architettonici si creano ampie piazze aperte mentre gli spazi interni sono articolati intorno a scale dal carattere monumentale, illuminate con luce naturale dall'alto che distribuiscono gallerie e sale sovrapposte.

Sugli stessi temi, Mario Botta lavora a Rovereto (2002) con il *Museo di Arte moderna e contemporanea* di Trento e Rovereto (MART). L'edificio si colloca ai piedi delle Alpi in continuità con la cortina preesistente e con la consistenza materica degli edifici limitrofi, realizzando un edificio al quale si accede da una piazza pubblica circolare coperta da una cupola in acciaio e vetro, con un piccolo specchio d'acqua centrale. L'edificio, lambito da un giardino di sculture, presenta sale interne che si sviluppano intorno a collegamenti verticali centrali e aperti sullo spazio di ingresso al piano terra. Tra gli altri, un museo che lavora su obiettivi simili è l'*High Museum of Art* di Richard Meier (Atlanta, Georgia 1980 - 1983).

Architetture simbolo



5. Frank Gehry, Museo Guggenheim di Bilbao
Foto dell'autrice

Attraverso la realizzazione di alcuni musei si è dato vita ad alcune delle figure-simbolo delle possibilità espressive della costruzione architettonica a cavallo del XXI secolo, gli edifici-macchina o gli edifici-icona. Con la costruzione del *Beaubourg, il Centro George Pompidou* (1977), Renzo Piano ed Richard Rogers realizzano un edificio, un parallelepipedo di dieci piani, il cui involucro corrisponde esattamente con il sistema strutturale, distributivo, tecnologico e impiantistico che consente il funzionamento del museo. La superficie esterna, totalmente trasparente e innervata da tubi e canali, mette in contatto le differenti funzioni ospitate all'interno dell'edificio con lo spazio pubblico della piazza limitrofa rispetto alla quale fa da quinta scenica, aparendo come lo scheletro di un enorme traliccio teatrale.

Una serie di volumi interconnessi caratterizza il *Museo Guggenheim* di Bilbao, aperto al pubblico nel 1997. L'edificio scolpito di Frank Gehry presenta una massa imponente, caratterizzata esternamente da superfici organiche inclinate e rivestite in titanio, elementi che rendono l'edificio un'architettura immediatamente riconoscibile per la sua immagine decostruttivista in riva al fiume, tanto da diventare una vera e propria attrazione turistica della città. Internamente l'edificio si sviluppa su tre piani aperti sullo spazio dell'atrio che ospitano diciannove gallerie connesse tra loro attraverso passerelle curvilinee sospese, scale e ascensori.

Una grande sperimentazione sulle potenzialità espressive del cemento rappresenta invece il *MAXXI, il Museo nazionale delle Arti del XXI secolo* di Roma progettato da Zaha Hadid nel 2009. Una dinamica stratificazione di volumi aperti l'uno nell'altro caratterizza lo spazio interno in cui gli spazi concavi e convessi delle gallerie fluide sono collegate da flessuose scale autoportanti in metallo nero. I morbidi volumi architettonici diventano all'esterno corpi sinuosi in cemento facciavista autocompattante che si avvolgono l'uno sull'altro.

Altri musei, solo per citarne alcuni, che sviluppano questi temi sono la *Kunsthau*s di Peter Cook e Colin Fournier (Graz, Austria 2003), la *VitraHaus* di Herzog e De Meuron (Weil am Rhein, Germania 2010), il *Museo del Domani* di Santiago Calatrava (Rio de Janeiro 2015), il *Musée des Confluences* di Coop-Himmelblau (Lione, Francia 2014).

Landmark nel paesaggio e architetture-suolo

In questo stesso periodo alcuni edifici museali si confrontano con una profonda volontà di integrazione nel paesaggio che li circonda. Il carattere delle sperimentazioni si è sviluppato secondo due filoni principali: uno sulla massima integrazione nel paesaggio, con un'architettura prevalentemente ipogea che presenta pochi elementi visibili in superficie e un altro che, pur riprendendone la morfologia del suolo e l'andamento orografico, si inserisce come un nuovo "elemento segnale" nel paesaggio. Su questo ultimo tema lavora *Alvaro Siza* a Porto Alegre in Brasile, attraverso la realizzazione dell'edificio della *Fondazione Iberé Camargo* (2006): una densa massa in cemento bianco inserita tra i pendii di un promontorio diventa il nuovo elemento di riferimento dell'intero porto. Il blocco museale si sviluppa a partire da un corpo centrale di circolazione ad elle che si affianca al corpo centrale costituito da gallerie sovrapposte, con un andamento ondulato verso il fiume. La massa architettonica, prevalentemente sprovvista di aperture verso il paesaggio, possiede solo piccole aperture che dall'esterno si ampliano verso l'interno, creando piccoli cannocchiali visivi di connessione.

A Kansas city, Steven Holl sceglie questo tema per sviluppare il progetto di ampliamento del *Nelson- Atkins Museum of Art* (2007) con un edificio che mescola architettura, arte e paesaggio attraverso la configurazione di cinque volumi in vetro traslucido che emergono dal suolo, mentre al di sopra delle coperture si trova il giardino delle sculture. L'ampliamento si relaziona con la preesistenza attraverso una piazza di ingresso e i nuovi componenti, collocati ad un margine del lotto, sono collegati tra di loro attraverso un piano ipogeo dal quale si dipartono i percorsi distributivi. Steven Holl lavora a questo tema, con risultati completamente diversi anche nella costruzione del *Museum of Art and architecture*, (Nanjing, Cina 2009) e del *Knut Hamsun Center* (Hamarey, Norvegia 2009).



6. Bernard Tschumi, Museo dell'acropoli di Atene
Foto dell'autrice

Un ulteriore esperimento su questo tema è quello sviluppato da Bernard Tschumi con il *Museo dell'acropoli di Atene* (2009), un edificio articolato intorno alla composizione di tre volumi a sviluppo prevalentemente orizzontale, uno di base a contatto con gli scavi archeologici rinvenuti all'ingresso, un volume centrale e infine uno superiore che si orienta in maniera parallela al Partenone. Questo volume è completamente vetrato e

consente continui rimandi visivi con la vicina Acropoli di cui custodisce i materiali archeologici.

Altri progetti di edifici museali lavorano sul tema dell'integrazione con il paesaggio circostante, ma attraverso un'ottica differente, più orientata all'inserimento silente nel contesto, senza volontà di protagonismo. E' il caso del *Centro Paul Klee* di Renzo Piano a Berna in Svizzera (2005), che si pone come parte integrante delle colline circostanti-fondendosi con il paesaggio naturale della campagna. Il suo tetto curvo fatto di travi in acciaio saldate, si delinea con un profilo ondulato simile a quello di tre collinette,

attraversabili con un percorso tra le "onde" e che si inserisce in maniera integrata nella conformazione topografica dell'area.

All'interno del paesaggio dell'isola giapponese di Naoshima si inserisce il progetto di Tadao Ando per il *Chichu Art Museum* (Kagawa, Giappone 2004). I bordi di una concatenazione di volumi triangolari e rettangolari emergono leggermente dal suolo in pendenza di uno dei fianchi dell'isola a suggerire la presenza di un'architettura. L'edificio museale si compone di un'ala-galleria e un'ala-ingresso completamente ipogee per rispettare lo scenario circostante verso il mare.

Gli architetti Nieto & Sobejano lavorano ad un edificio ipogeo nel *Museo interattivo della storia*, un museo-parco nel centro storico di Lugo in Spagna (2011). Dal sottosuolo emergono cilindri metallici che indicano la presenza di un'architettura al piano sottostante dove si distribuiscono gli spazi museali. Attraverso i cilindri si articolano i percorsi di connessione alto-basso, passa la luce negli spazi inferiori e viene caratterizzato lo spazio aperto del parco.

Su questi temi hanno lavorato: lo Studio Odile Decq nel *Fangshan Tangshan National Geopark Museum*, (Nanjing, Jiangsu, Cina 2014), Mosbach Paysagistes, Kazuyo Sejima + Ryue Nishizawa / SANAA, Studio Adrien Gardère nel *Musée du Louvre*, a Lens in Francia (2012).

Interventi sull'esistente

L'ampliamento di musei antichi e la riconversione di edifici con funzione precedente diversa da quella museale, rappresentano altri due ampi filoni di indagine con i quali si è confrontata l'evoluzione della tipologia museale negli ultimi anni.

In questo specifico ambito progettuale dove alla complessità di un edificio museale si aggiungono quelle

legate al confronto con strutture esistenti l'intervento di Herzog & De Meuron per la riconversione della centrale elettrica londinese dismessa dal 2000 è sicuramente un esempio di successo. Gli architetti lavorano al recupero dell'edificio realizzando la *Tate Modern* (Londra, 2012), il museo di arte moderna più visitato al mondo. Rispettano fortemente il carattere industriale dell'edificio: esternamente l'intervento è visibile solo per la presenza di una fascia orizzontale in vetro traslucido in corrispondenza del coronamento dell'edificio. All'interno lo spazio ad aula, di quella che era la "navata industriale", viene lasciato intatto, ma ad esso si affiancano le gallerie innestate lateralmente. Lo scorso mese di giugno è stato inaugurato un nuovo elemento al museo: uno spazio a torre che duplica in chiave completamente rivisitata la ciminiera della ex centrale elettrica per ospitare gallerie e nuovi spazi di aggregazione.



7. Herzog & De Meuron, Tate Modern, Londra

Foto D.Alston (free to copy and use photo)

Il progetto di Rafael Moneo per l'ampliamento del *Museo Prado* di Madrid (2007) rispetta l'edificio originale, i suoi dintorni e le peculiarità degli edifici adiacenti, la Chiesa dei Jeronimos e l'Academia Española. L'ampliamento collega il museo ad un nuovo edificio e al chiostro della chiesa restaurato, attraverso una connessione ipogea sulla cui copertura viene ricavato un nuovo giardino che contribuisce a migliorare anche la qualità dello spazio urbano circostante. All'interno, la superficie disponibile in seguito all'ampliamento è stata utilizzata in modo innovativo, con spazi museali che si affacciano l'uno nell'altro e che si caratterizzano per una compresenza di materiali antichi e moderni.

Interventi che sviluppano questo tema sono quelli realizzati da David Chipperfield a Berlino e a Milano. Il progetto di restauro del *Neues Museum* (Berlino 2009) lavora sul ripristino del volume originale, fortemente danneggiato dalla seconda guerra mondiale nel rispetto della materialità della struttura storica e delle sue caratteristiche spaziali.

David Chipperfield ha lavorato anche a Milano alla realizzazione di un edificio museale, intervenendo nell'ex area Ansaldo su via Tortona in con il *MUSEO DELLE CULTURE, MUDEC* (Italia, 2015). Il complesso museale reinterpreta le volumetrie industriali preesistenti attraverso un'aggregazione di corpi squadrati rivestiti in zinco-titanio, i quali si sviluppano intorno a uno spazio centrale di forma organica in cristallo opaco, che rompe la geometria pura dei corpi circostanti e forma una piazza coperta come fulcro baricentrico dell'intero museo. Le pareti curvilinee di questo spazio, intersecando gli spazi museali, si ampliano ad ospitare una vetrina continua, dal contenuto eterogeneo che varia insieme al susseguirsi degli spazi che si avvolgono intorno ad essa.

Una ulteriore sperimentazione è in corso di realizzazione a Milano, grazie al lavoro progettuale di OMA Rem Koolhaas su un preesistente complesso industriale che ha dato vita alla *Fondazione Prada* (Italia). Il complesso presentava una grande varietà di spazi alla quale l'architetto ha aggiunto un grande padiglione espositivo, una torre, un cinema e un sistema di percorsi di connessione innestati tra i singoli corpi.

"La Fondazione non è un progetto di conservazione e non è una nuova architettura. Due condizioni che di solito vengono tenute separate. Qui il confronto si svolge in uno stato di interazione permanente - che consente ad un insieme di frammenti di non coagularsi in un'unica immagine e impedisce a qualsiasi parte di dominare sulle altre. Nuovo, vecchio, orizzontale, verticale, largo, stretto, bianco, nero, aperto, chiuso, tutti questi contrasti stabiliscono la gamma di opposizioni che definisce la nuova Fondazione. Con l'introduzione di così tante variabili spaziali, la complessità dell'architettura promuove un'instabile programmazione aperta, dove arte e architettura potranno beneficiare di ogni altre sfide" dice Rem Koolhaas. (<http://oma.eu/projects/fondazione-prada>).

Su questi temi si collocano anche il progetto *Grand Louvre*. Un primo ampliamento della sede di Parigi, voluto dal presidente Mitterrand, fu realizzato con gli interventi di Iang Ming Pei nel 1989 con la famosa piramide di ingresso, a cui seguì nel 2009 il progetto di Mario Bellini e Rudi Ricciotti con l'inserimento del Padiglione del Dipartimento delle Arti Islamiche nel cortile dell'ala Visconti. Da segnalare anche il lavoro di Jean-Michel Wilmotte, Van Hoogevest, Cruz y Ortiz Arquitectos nel restauro del *Rijksmuseum* (Amsterdam 2012).

2. L'allestimento degli spazi espositivi

Il tema degli allestimenti espositivi realizzati in strutture museali, solitamente in maniera permanente, si pone come percorso narrativo che dalla struttura fisica del museo raggiunge il visitatore in un processo di progressiva scoperta e di conoscenza delle opere o dei contenuti esposti, in molti casi realizzati per esposizioni temporanee in occasione di eventi di divulgazione scientifica o artistica.

Rispetto alla museografia che attiene più alla costituzione fisica dello spazio museale, l'allestimento è

strettamente connesso alla fruizione, comprensione e percezione del museo e dei materiali delle collezioni, ed ha il compito di mettere in comunicazione l'opera d'arte con il visitatore del museo. In una analogia proposta da Michael Brawne gli allestimenti espositivi sono concettualmente vicini alla scenografia teatrale, e in questo confronto il teatro rappresenta il museo, la parte stabile e solida, il contenitore fisico dove le esperienze accadono, dove le idee comunicative si concretizzano.

Da quando il museo si è trasformato da tempio aulico e sacrale, frequentato quasi esclusivamente da esperti e studiosi, a luogo aperto al grande pubblico, le mostre e gli allestimenti espositivi hanno cambiato linguaggio per diventare elementi di forte attrazione.

Se l'allestimento prima della guerra era strettamente connesso al concetto del museo-collezione, e quindi era un'attività volta ad esaltare la preziosità degli oggetti dotandoli di una cornice sfarzosa che ne sottolineava il prestigio e il valore, nel dopoguerra prevale la volontà evocativa e comunicativa, con l'impegno a rendere pienamente comprensibili gli oggetti esposti e gli allestimenti diventano racconti capaci di emozionare e coinvolgere emotivamente il visitatore, utilizzando strumenti presi dalla scenografia teatrale e cinematografica.

2.1. La stagione dei grandi maestri del secondo novecento in Italia

Il progetto degli allestimenti, l'exhibit design, con sistemi di vetrine e pannelli, apparati di illuminazione e comunicazione è stato il banco di prova riconosciuto dell'architettura moderna italiana, segnando la stagione dei grandi maestri di questa particolare disciplina in cui progettisti del calibro di Carlo Scarpa, Franco Albini, Franco Minissi, Pier Giacomo Castiglioni, Marcello Nizzoli e altri si sono espressi ai massimi livelli, maturando un linguaggio attento alla spazialità interna e all'uso dei materiali, alla luce e alla prospettiva, alla comunicazione visuale e grafica. Una vera e propria scuola e tradizione italiana, riconosciuta universalmente, è quella che si sviluppa negli anni del dopoguerra, tra il 1950 e il 1960, come sperimentazione trasversale che intreccia i temi del restauro, con il recupero a sedi museali di numerosi edifici storici bombardati durante il periodo bellico, e i temi della progettazione in campo museografico. In questo periodo nuovi approcci compositivi sono legati alla figura di alcuni architetti in particolare.

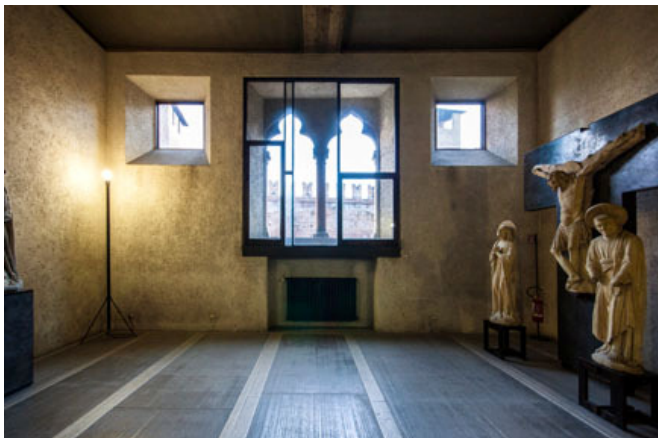
In opposizione alla tendenza europea volta a realizzare musei come contenitori indistinti di opere d'arte, e grazie alle straordinarie occasioni di sperimentazione rappresentate dalle esposizioni della Triennale di Milano e dalle fiere di Milano e di Bari, durante le quali una generazione di architetti lavorò sul tema dell'allestimento, sviluppando il tema del museo come "fatto d'arte complessivo che coinvolge la costruzione, l'allestimento, le opere esposte". Si ritorna al museo inteso come scrigno, per usare le parole di Louis Kahn, che si contrappone all'indifferenziazione spaziale e architettonica di molti nuovi musei europei dell'epoca.

In questo periodo la creazione o la ristrutturazione dei musei è un tema di architettura attraverso il quale sperimentare materiali, tecnologie e linguaggi.

All'interno di questo quadro complessivo, in tre occasioni principali Carlo Scarpa lavora al tema del recupero di edifici storici come sedi museali: a Verona, nella nuova sistemazione del *Museo di Castelvecchio* (1958-75), in provincia di Treviso, a Possagno, con l'ampliamento della *Gipsoteca Canoviana* (1956-57) e a Palermo con il progetto per la *Galleria regionale della Sicilia a Palazzo Abatellis* (1953-54).

Castelvecchio, la struttura difensiva scaligera trecentesca di Verona, fu destinato a sede delle collezioni comunali d'arte e tra il 1923 e il 1926 è oggetto di un primo restauro. Durante la guerra subì danni ingenti successivamente ai quali fu ricostruito "com'era e dov'era". Nel 1958 successivamente ad un primo allestimento, a Carlo Scarpa fu commissionato il restauro di gran parte del castello e la sistemazione museografica di opere pittoriche e scultoree appartenenti all'arte di Verona e del suo territorio dal XII al

XVIII secolo. Scarpa approfondisce i temi di valorizzazione tra la preesistenza storica, i nuovi inserimenti architettonici e le opere d'arte e li sviluppa magistralmente nel progetto dei percorsi, con nuove passerelle e scale, nel sistema di illuminazione naturale, realizzando la vetrata in corrispondenza del sacello, nell'innesto di nuovi setti murari negli spazi preesistenti come quello che divide i servizi igienici e disegna lo spazio museale. Avvicina il nuovo all'antico attraverso l'interposizione di un "vuoto" che realizza con una nuova pavimentazione leggermente staccata dai setti murari preesistenti, disegna gli elementi espositivi per adattarli alle necessità spaziali, morfologiche e comunicative delle singole opere e delle specifiche aree museali. E' il caso dei supporti delle statue che appaiono quasi sospese dal pavimento, o del pannello metallico che sorregge la crocifissione. Anche la sistemazione della statua equestre di Cangrande la fa apparire semisospesa sul cortile, visibile quasi da qualunque parte del castello e riferimento per l'intero percorso museale.



8. Carlo Scarpa, Museo di Castelvecchio
foto courtesy www.inexhibit.com

A Palermo Carlo Scarpa lavora all'interno delle sale del quattrocentesco *Palazzo Abatellis*, un palazzo patrizio che diventò sede di un monastero nel 1527 subendo numerose modifiche. Successivamente ai bombardamenti e dopo i lavori di restauro, anche in seguito alla mostra del 1953 dedicata ad Antonello da Messina, la sistemazione dell'edificio come museo fu affidata a Carlo Scarpa. Qui il lavoro dell'architetto si concentrò, dal punto di vista dei nuovi inserimenti architettonici, nella realizzazione di due scale, una esterna e una interna, per razionalizzare il percorso di visita alla mostra. Dal punto di vista allestitivo l'architetto realizzò inconsuete collocazioni, nuove prospettive di lettura e sfondi mutevoli per opere che sembrarono liberate dai tradizionali canoni di lettura museografica.

All'ampliamento del *Museo Canova*, Carlo Scarpa iniziò a lavorare nel 1957, successivamente ai lavori di restauro, per porre rimedio ai danni provocati dai bombardamenti bellici. L'allestimento prevede che le pareti, che facevano da sfondo ai gessi, fossero bianche e disegnate attraverso precisi tagli, in corrispondenza di spigoli e variazioni di altezza, per consentire l'ingresso della luce naturale, protagonista degli spazi, a valorizzare le sculture.

Franco Albini lavorò prevalentemente a Genova, realizzando tre opere principali nel campo dell'esposizione museale: due allestimenti in edifici preesistenti e un vero e proprio museo.

Intorno al 1950 lavorò su *Palazzo Bianco* a Genova, un edificio, di origine cinquecentesca a destinazione museale dal 1889, rimaneggiato più volte fino alla sua quasi totale ricostruzione, nella sua immagine settecentesca, in conseguenza ai danni causati dai bombardamenti bellici.

In questa occasione, l'allestimento curato da Franco Albini creò un doppio percorso museale, sviluppando il tema dell'accostamento tra antico e nuovo e della conservazione della leggibilità dell'architettura dell'edificio. Il doppio percorso museale era composto da un primo tratto all'interno delle grandi sale e un secondo suddiviso tra i magazzini del piano intermedio e quelli del sottotetto, completamente ripensati in una nuova veste di gallerie secondarie. In questi spazi, i quadri non erano mai addossati alle pareti

dell'edificio, ma appesi o su piantane tubolari in ferro fissate su rocchi di colonne antiche, o su tondini che scorrevano all'interno di guide fissate a ridosso delle volte. Una soluzione particolare fu quella realizzata per la sistemazione del gruppo marmoreo di Giovanni Pisano che fu posizionato su un supporto metallico mobile e girevole a piacimento da parte dello spettatore, il quale in questo modo veniva maggiormente coinvolto nell'esposizione. Inoltre la base era fissata in maniera asimmetrica, così come suggerito dal soggetto della scultura, al di sopra di un supporto telescopico con pompa idraulica. Albini schermò le finestre con veneziane a lamelle di alluminio grigio in modo da ottenere una luce bianca diffusa che veniva integrata con tubi fluorescenti che disegnavano linee luminose all'interno delle sale con un'altezza proporzionata con la dimensione delle opere esposte.



9. Franco Albini, Museo del Tesoro di san Lorenzo

Foto dell'autrice

Negli stessi anni Franco Albini lavora anche all'allestimento di *Palazzo Rosso*, sempre a Genova. Questo edificio seicentesco fu oggetto di continue manomissioni fino a quelle inflitte dai bombardamenti, successivamente alle quali si decise di intervenire sull'edificio recuperandone la configurazione architettonica e decorativa originaria.

Gli spazi dell'architettura barocca dell'edificio vengono ripristinati attraverso l'eliminazione di vecchi tramezzi innalzati a chiusura di porticati e logge e la sostituzione con vetrate, mentre viene costruita una grande scala ottagonale sostenuta da tiranti metallici come simbolo della sua poetica architettonica. Nelle sale dedicate al museo, le opere, selezionate e riordinate, furono esposte prevalentemente

attraverso due modalità: o appese attraverso un supporto metallico ad una barra orizzontale fissata al di sotto dell'imposta della volta, oppure fissate ad un supporto a bandiera, adattabile alle dimensioni delle tele capace di ruotare per ottenere un orientamento rispetto alla luce. Un ulteriore elemento espositivo a vetrina fu quello studiato per la sezione di arti applicate: vetrine cruciformi con bracci di differente lunghezza o sospese al muro con una sorgente luminosa integrata nel cielino.

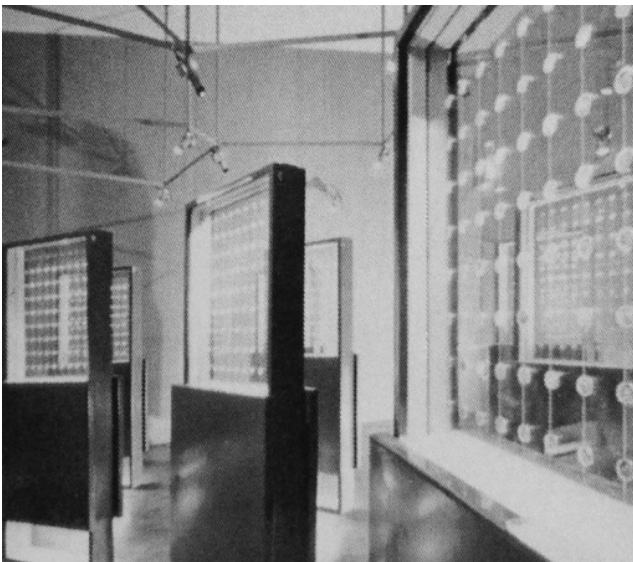
In generale l'illuminazione naturale era garantita dalla presenza di ampie finestre schermate da tende e integrata da lampade a incandescenza agganciate alla barra alla quale erano sospesi i quadri, con elementi doppi in parte rivolti a illuminare gli affreschi delle volte.

Nel 1953 viene inaugurato il *Museo del Tesoro di San Lorenzo* negli spazi ipogei, appositamente realizzati, della cattedrale di Genova. L'edificio raccoglie oggetti già precedentemente conservati nei depositi della cattedrale, ma realizza per la loro esposizione un vero sistema museale composto da tre sale circolari di diverso diametro, illuminate zenitalmente e collegate tra loro da uno spazio esagonale, i cui vertici corrispondono con i centri delle cupole ribassate delle tre sale. Sia la struttura estradossata delle sale che il disegno della pavimentazione enfatizza la geometria compositiva del museo che accoglie arredi espositivi dal carattere essenziale e calibrato sullo specifico oggetto da esporre.

Nell'immediato dopoguerra e in particolare nel 1947, il Comune di Milano inizia ad individuare alcuni spazi adatti ad ospitare le collezioni delle Raccolte Civiche del XX secolo. Vengono scelte le ex scuderie della Villa Reale, edificio in stile neoclassico della fine del XVIII secolo, distrutte dai bombardamenti del 1943, sede per la costruzione del Padiglione di Arte Contemporanea (PAC). Nel 1948 viene selezionato il progetto di Ignazio Gardella che concilia due tipologie di approccio al contrario di altri progetti proposti che affrontavano e

svilupparono il tema in maniera univoca. Gardella prevede da un lato la fedele ricostruzione del volume del complesso precedente con semplice adattamento dello spazio museale interno, dall'altro la costruzione di un corpo architettonico del tutto nuovo concepito come una perfetta macchina museale. Nel 1954 viene inaugurato il nuovo Padiglione alternando fin da subito la funzione espositiva permanente con quella temporanea. Mantenendo alcuni degli elementi caratterizzanti il preesistente volume delle ex scuderie e combinandoli con un'innovativa articolazione degli spazi interni, l'edificio riprende la sagoma trapezoidale e la volumetria dei due livelli visibili dall'esterno e realizza internamente tre livelli con complesse e articolate variazioni di quota. Questa compenetrazione degli ambienti determina una fluidità dello spazio, una ottimizzazione degli spazi senza alterare la volumetria complessiva che richiama quella preesistente. I tre livelli interni sono flessibili e intercomunicanti, suddivisi in aree per la scultura al primo livello, pittura al secondo, disegni, documenti e oggettistica al terzo. Il tema dell'illuminazione viene affrontato attraverso differenti declinazioni, in particolare al piano terra, l'ampia vetrata consente l'ingresso di luce diretta e naturale che, arrivando radente alle sculture, ne valorizza la valenza plastica.

Architetto italiano di rilievo nell'ambito dell'allestimento museale e del progetto di musei è Franco Minissi. Oltre ai suoi numerosi interventi di conservazione e valorizzazione di siti archeologici, tra le sue realizzazioni più note spiccano: l'allestimento di *Villa Giulia* a Roma, del *Museo Archeologico di Gela* a Caltanissetta e del *Museo Archeologico di Agrigento*.



10. Franco Minissi, Museo archeologico di Gela, Caltanissetta (Italia)

Foto da B. A. Vivio, Franco Minissi. Musei e restauri: la trasparenza come valore, Gangemi Editore, 2010

[\(da inviare ad alta risoluzione\)](#)

La villa cinquecentesca di papa Giulio III, smembrata e restaurata più volte, diventò sede museale a partire dal 1889. Alla fine della seconda guerra mondiale gli ambienti non erano più sufficienti ad accogliere i reperti, disposti per di più in maniera impropria. Tra il 1950 e il 1960 Franco Minissi realizzò una serie di interventi concatenati tra loro, mettendo in atto una operazione di razionalizzazione e ampliamento dei percorsi espositivi, in termini di continuità tematica e funzionale, soprattutto attraverso l'aggiunta di un piano intermedio alle ali moderne della villa, e poi con l'apertura di lucernari e nuove finestre, per il miglioramento dell'illuminazione. L'architetto ripensò la sistemazione dei materiali espositivi, sia in termini scientifici che per l'estetica e la funzionalità espositiva. Eliminò ogni elemento di disturbo alla visione degli oggetti esposti, intervenendo sugli ambienti e sulla collocazione degli oggetti in termini di forma, colore, illuminazione e arredamento, aggiungendo tutto il materiale didattico necessario. Ripensò l'allestimento in termini di omogeneità complessiva progettando vetrine a muro, a parapetto e a isola facendo uso di cristalli portanti per non interrompere la continuità complessiva dello spazio. Il tema della smaterializzazione è evidente nella collocazione del sarcofago degli sposi di Cerveteri all'interno di una

vetrina minimale e "trasparente", che diventa un punto di riferimento, focale, rispetto allo sviluppo complessivo del percorso di visita.

Franco Minissi lavorò poi al *Museo Archeologico di Gela* tra il 1955 e il 1980, con interventi di restauro e ampliamento dell'antiquarium preesistente, attraverso la riconfigurazione del suo allestimento interno. L'ampliamento avvenne mediante l'innesto di un piano intermedio con vetrine perimetrali incassate a parete.

I nuovi vani che ospitavano le vetrine furono resi visibili all'esterno attraverso l'elaborazione di una facciata modulare che mostrava la sequenza delle vetrine, connesse con il ritmo dei pilastrini a sostegno del corpo aggiunto, moderando così la retorica monumentale dell'edificio. Franco Minissi elaborò una stringente organizzazione in sezioni tematiche, ognuna strutturata attraverso l'uso di vetrine di forme e dimensioni adattate alla qualità dello spazio, alla funzionalità della macchina espositiva e alle caratteristiche dell'oggetto esposto.

2.2. Il design delle vetrine. Evoluzione di un sistema espositivo

"L'invenzione formale di una vetrina protettiva di esposizione, la definizione della distanza visuale da un'opera, l'invenzione di un supporto espositivo di appoggio o di sostegno, l'individuazione, la collocazione e la qualità delle sorgenti luminose e le infinite altre soluzioni tecniche e formali per soddisfare le varie particolari esigenze espositive delle raccolte museali sono generalmente e teoricamente gli strumenti dell'allestimento. Strumenti che vanno spesso, come nel nostro caso, relazionati e integrati dalla esigenza di valorizzare e sottolineare i valori propri della sede storica preesistente che ospita le raccolte museali". Franco Minissi sintetizza efficacemente i molteplici aspetti connessi alla progettazione di una vetrina, il contenitore espositivo museale per eccellenza, la finestra tematica che fa da interfaccia a contenuti, che deve temperare gli aspetti di controllo dei parametri tecnici per la conservazione e la protezione degli oggetti, ma dove è anche possibile misurare le dinamiche trasformative del concetto di comunicazione culturale e interazione attraverso l'evoluzione del suo design.

Abbiamo illustrato le prime esperienze di-design di progettate da architetti italiani che hanno operato nel secondo Novecento, con interventi museali nei quali la configurazione della vetrina corrisponde con la creazione di un oggetto dal design unico che non mira tanto a soddisfare criteri di flessibilità o modularità, quanto a rapportarsi a valori di originalità e autenticità. All'interno del processo di creazione, sono stati presi in considerazione le necessità di integrazione con le componenti dell'illuminazione in un'ottica integrata, e quelle della migliore configurazione atta ad esporre elementi in maniera ottimale rispetto alle caratteristiche ergonomiche-fisiologiche-percettive dell'osservatore.

In particolare i ragionamenti di Franco Minissi sulla minima invasività, sulla corrispondenza tra elementi di supporto ed elementi strutturali, sulla possibilità di portare un'illuminazione naturale all'interno della vetrina, lo portano a sperimentare le nuove soluzioni, che rappresentano anche un elemento di esposizione in cui sinteticamente viene riassunto tutto il concept tematico dell'intero allestimento.

Altre esperienze si sviluppano negli anni più recenti come nella mostra *Mito e Natura. Dalla Grecia a Pompei*, allestita da Francesco Venezia in alcune sale di Palazzo Reale a Milano in occasione di Expo 2016 nella quale l'autore propone viste insolite e percorsi che puntano ad una visione non consueta delle opere. "L'insieme di finestre di dimensioni e forme differenti, ma tutte molto profonde, con una forte strombatura che vuole simulare un muro che contiene le opere d'arte, è come già è stato detto, una critica ai grandi musei dell'Ottocento dove le opere sono messe una accanto all'altra, rendendo impossibile concentrarsi su una senza essere distratti dall'altra. Francesco Venezia, non solo ci obbliga a guardare una per volta le opere esposte, ma addirittura ci obbliga a cercarle con gli occhi, avvicinandoci alle grandi finestre, perché sono quasi sempre disposte eccentricamente rispetto all'apertura del vano" (Monestiroli A., 2016).

Un altro esperimento interessante si trova nel Dipartimento di Arti Islamiche di Mario Bellini e Rudy Ricciotti, con il progetto museografico e di allestimento di Mario Bellini e Renaud Pierard, inaugurato a settembre del 2012 nella *Cour Visconti del Louvre*, a Parigi. L'intero padiglione può essere considerato come una grande vetrina fuori-scala perimetrata da lastre di vetro extra chiaro a forte spessore con giunti invisibili la quale contiene a sua volta, all'interno di uno spazio senza suddivisioni interne, 60 vetrine in cristallo di varie dimensioni dove sono collocati a rotazione dai 3 ai 4 mila oggetti della collezione dell'arte islamica del Louvre. Tutta la circolazione interna al padiglione è legata al posizionamento delle vetrine che combinano engineering design ed exhibition design, in una "sintesi felice di robustezza, tenuta e assoluta trasparenza". Sempre in Francia l'Atelier Jan Nouvelle realizza un grande padiglione con pareti vetrate per il sito-museo gallo romano di Perigueux. Al suo interno, le vetrine formano un tutt'uno con le finiture dei percorsi espositivi, attraverso "vetrine a tavolo con campana in cristallo apribile a sollevamento", un dispositivo con martinetti telescopici idraulici messo a punto da Goppion per risolvere il problema della ridotta altezza della base.

2.3. La vetrina: dalla protezione alla conservazione

Un aspetto fondamentale, di carattere tecnico, riguarda il passaggio storico fondamentale nel quale la vetrina è da semplice contenitore protettivo diventa un dispositivo che consente la corretta conservazione degli oggetti esposti. Anche in questo caso l'aspetto interessante sta nel connubio tra esigenze tematiche e di design e quelle tecniche della conservazione e della manutenzione.

Il Ministero per i Beni e le Attività Culturali, nell'*Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei* si esprime molto chiaramente a tal riguardo nell'articolo 3, Ambito VI "Contenitori espositivi (vetrine, climabox e simili)", specificando come: "le vetrine non debbano essere più intese come semplici contenitori – magari valorizzati da un design di qualità – ma siano invece concepite come vere e proprie opere o presidi che, realizzate a completamento della manutenzione o del restauro di un manufatto, facciano parte a pieno titolo dell'intero processo conservativo".

La ricerca scientifica e le innovazioni tecnologico hanno permesso un grande avanzamento delle prestazioni tecniche, estetiche e conservative delle vetrine. Gli architetti Guicciardini&Magni progettano un'enorme vetrina monolitica per la porta del Paradiso nel Museo dell'Opera del Duomo di Firenze (Italia 2012), dotata di sofisticati sistemi tecnologici: una illuminazione lineare con lenti ellittiche per la riduzione delle ombre proiettate sul fondale, un dispositivo di tenuta per la stabilizzazione dell'umidità relativa, l'avanzamento elettrico per consentire la manutenzione e la regolazione della posizione dell'elemento esposto in relazione al sistema illuminotecnico, e un meccanismo esterno alle vetrine per il controllo delle condizioni interne.

Dimensioni ancora superiori presenta la stanza vetrata di 70 m² per l'esposizione del tappeto di Ardabil, capolavoro dell'artigianato iraniano conservato a Londra nel Victoria and Albert Museum, esposto orizzontalmente a livello del pavimento in modo tale che i visitatori "possano godere di un'ottima visuale e i curatori effettuare agevolmente le operazioni di manutenzione".



11. Lorenzo Piqueras vetrina per Monna Lisa 2004, Musée du Louvre, Salle des Etats, Parigi (Francia)

(chiedere a Goppion l'immagine ad alta risoluzione)

Una soluzione che ha messo in campo sistemi di ingegnerizzazione molto avanzati è quello realizzato per la vetrina della "Monna Lisa", dove venivano richieste elevatissime prestazioni, tra le quali la sicurezza, il controllo igrometrico e perfezione percettiva.

Altro aspetto di cruciale importanza per la conservazione delle opere è quello del controllo delle vibrazioni meccaniche, che, insieme a quello della semplicità di apertura e controllo degli sbalzi di umidità, è stato sviluppato nel progetto per l'esposizione e la conservazione del Reliquiario di Ugolino di Vieri nel Duomo di Orvieto (Italia 1994-1995) con la messa a punto di "uno speciale sistema contro le vibrazioni, in particolare quelle sismiche, costituito da una zavorra oscillante per mezzo di molle, che assorbe l'energia impressa alla struttura".

2.4. La vetrina come strumento di comunicazione

In linea con le tendenze della rivoluzione digitale la vetrina, come teca espositiva, assume conformazioni sempre più aperte a contenere al suo interno elementi di differente consistenza, sia materiali che tridimensionali, dati grafici, dispositivi multimediali e contenuti video.

Possono essere definite nuove forme di vetrine, dal carattere interattivo i *touch walls*, i *touch tables*, i *touch desks*, i *totem multimediali* e gli *holoboxes*. Estesi ad intere superfici architettoniche possono prendere la forma di video walls e video floors. Queste tipologie di diaframmi vetriati, schermi proiettanti, oltre a diffondere contenuti, interagiscono con il visitatore che è chiamato in un ruolo attivo nella scelta dei contenuti. Allestimenti o installazioni temporanee più recenti tendono alla smaterializzazione del contenitore, della vetrina, puntano alla realizzazione di eventi dinamici, organici, in luoghi non più soltanto destinati alla raccolta e all'esposizione, ma dove creare sorpresa, riflessione, esperienza cognitiva e sensoriale. Il progetto "La stanza del vuoto" di Parisotto + Formenton architetti, ad esempio, propone un ribaltamento tra oggetto esposto e visitatore: il visitatore è chiamato all'interno dello spazio definito dalla stanza-vetrina priva di chiusure orizzontali, con pareti esterne specchianti, struttura in acciaio e ledwall interni che trasmettono contenuti video.

Nell'ambito di queste nuove modalità di racconto aperto, interattivo e coinvolgente, **Studio Azzuro** ha messo in campo la sua formazione ed esperienza artistica a favore dell'esposizione museale, sperimentato i dispositivi più aggiornati e le procedure più insolite, utilizzando il linguaggio delle nuove tecnologie e degli audiovisivi. La videoinstallazione *Voices* progettata nel 2014 con Domus e collocata al centro del Chiostro del Conservatorio G. Verdi, compone, attraverso una variegata moltitudine di frammenti e di racconti orali, una mappa della città disegnata, immaginata e vissuta nel presente e in rapporto alle personali chiavi interpretative del visitatore o spettatore.

3. Il museo del futuro

Appare chiaro che oggi gli interventi di rinnovamento museale sono connessi con nuovi piani di comunicazione e di allestimento, spesso su strutture esistenti, e si avvalgono sempre più di linguaggi multimediali, adottando strumentazioni e tecnologie innovative. Dimenticata la schematica sequenza di vetrine e pannelli l'esposizione contemporanea si avvale di scenografie complesse, spazi di ispirazione teatrale che utilizzano effetti speciali attraverso i quali la presentazione degli oggetti diventa dinamica, interattiva, interloquisce con il visitatore che assume un ruolo attivo, partecipativo, stimolato da accostamenti persuasivi e originali a interagire modificando gli scenari e i paesaggi espositivi. E sempre più le rappresentazioni e le manifestazioni artistiche si diffondono nelle città divenendo protagoniste di una rivoluzione culturale appena agli inizi.

3.1 Museo diffuso: l'arte fuori dal museo

All'interno del percorso evolutivo del museo, una tappa fondamentale è quella costituita dall'uscita dell'opera d'arte dallo spazio museale vero e proprio per trovare luogo nell'ambiente urbano e paesaggistico. Tra le prime manifestazioni di questo passaggio epocale, in Italia ci sono stati alcuni eventi simbolo quali: *Sculture nella città*, realizzata da G. Carandente a Spoleto per il Festival dei Due Mondi nell'estate del 1962; *Campo urbano. Interventi estetici nella dimensione collettiva urbana*, curata da L. Caramel, U. Mulas e B. Munari a Como nel 1969; *Volterra 73. Interventi nella città*, curata da E. Crispolti e M. Trafeli a Volterra nel 1973; *Ambiente/Arte. Dal Futurismo alla Body Art* curata da G. Celant alla Biennale di Venezia del 1976. La fruizione dell'arte diventa un'esperienza non più dedicata a classi privilegiate di cittadini, ma si diffonde negli spazi dello svolgimento della vita pubblica delle comunità coinvolgendole e stimolandole, in assenza di sovrastrutture.

Esperienza di quegli anni segnata dalla volontà di riappropriazione da parte della cittadinanza dei luoghi simbolo e archeologici della città, è stata *l'Estate Romana*, promossa da Renato Nicolini nel 1977, poi ribattezzata *Magnifico Urbano*, un'iniziativa a carattere culturale che prevedeva lo svolgimento di manifestazioni che avessero come sfondo la Basilica di Massenzio. "La sorpresa maggiore - sostiene Nicolini molti anni dopo - è stata la riscoperta dell'area archeologica centrale come luogo dell'accesso universale, non più riservato ad élite privilegiate". Negli anni successivi, questa tendenza si è calata anche all'interno dei luoghi dell'attraversamento urbano per eccellenza: le stazioni della metropolitana sono diventate, in città come Napoli, Stoccolma, Atene, spazi in cui l'arte e l'architettura di personalità di spicco nel settore in ambito internazionale, diventano accessibili, attraversabili, capaci di migliorare significativamente la qualità della vita urbana e di riqualificare interi quartieri.

Inaugurate nel 2001, le *Stazioni dell'Arte* di Napoli nascono da un progetto promosso dall'amministrazione comunale nel 1995 per rendere i luoghi della mobilità più attraenti e offrire a tutti la possibilità di incontri con l'arte contemporanea. Gli spazi interni ed esterni delle stazioni hanno accolto, con il coordinamento artistico di Achille Bonito Oliva, circa 200 opere di 100 tra i più prestigiosi autori contemporanei, divenendo museo decentrato e distribuito sull'intera area urbana, percorso espositivo aperto, per una fruizione dinamica del manufatto artistico, coniugando arte, architettura e archeologia. All'interno della rete metropolitana, nel 2012, è stata inaugurata la stazione Toledo, la più bella d'Europa secondo il quotidiano britannico Daily Telegraph e anche secondo un'autorevole classifica della CNN. E se nel 2013 le veniva conferito l'Emirates Leaf International Award come "Public building of the year", nel novembre del 2015 ha ricevuto un ulteriore importante riconoscimento: a Hagerbach, cittadina nei pressi di Zurigo, le è stato assegnato il premio ITA – International Tunnelling Association, ovvero l'Oscar delle opere in sotterraneo,

per la categoria "Uso innovativo degli spazi". I meriti riconosciuti riguardano le tecnologie innovative utilizzate nelle fasi di scavo, ma soprattutto l'idea alla base del progetto architettonico: la progressiva immersione dalla terra verso il mare, realizzata attraverso le micro tessere dell'azienda Bisazza, i mosaici di William Kentridge, i light boxe con pannelli lenticolari di Bob Wilson.

Un'ulteriore esperienza, nell'ambito dell'uscita dell'arte dal campo museale, riguarda il *MAU, Museo di Arte Urbana di Torino*, un insediamento artistico permanente all'aperto collocato all'interno di un grande centro metropolitano, sviluppatosi con il contributo degli abitanti. A partire dal 1991, il Borgo Vecchio Campidoglio, un quartiere operaio di fine '800, inizia a essere interessato da azioni di riqualificazione urbana. Nella primavera 1995, l'intervento inizia a indagare la possibilità di inserire la componente artistica all'interno della esperienza di rinascita del borgo, coinvolgendo i cittadini nelle scelte, cogliendo la disponibilità di alcuni proprietari di immobili a concedere le proprie pareti per la realizzazione di opere d'arte condivise e permanenti, poi proseguita nel tempo fino agli esiti attuali. Dal 1995 ad oggi sono state prodotte 113 opere murarie, anche con il coinvolgimento di giovani artisti, all'interno del Borgo Vecchio, alle quali si sono affiancate, dal maggio 2001, altre 35 nuove installazioni costituenti la "Galleria Campidoglio".

3.2 Musei virtuali e spazi immersivi

Nel terzo millennio la sfida evolutiva dell'edificio museale non è più legata all'ampliamento di una collezione o al rinnovamento degli spazi: al museo viene richiesto di essere sempre più flessibile e suggestivo, in grado di adattarsi alle esigenze in continua evoluzione della diffusione culturale e di essere al passo con le innovazioni tecnologiche che coinvolgono ambiti sempre maggiori della vita quotidiana delle persone. "È come se ci trovassimo di fronte ad un doppio 'guscio': uno più stabile che corrisponde all'esterno, all'architettura della città e alla sua immagine, e uno mutevole, adattabile, che corrisponde allo spazio, o agli spazi interni, e che è la cornice modificabile - quasi fosse una macchina teatrale - entro cui si possono collocare i differenti apparati espositivi o direttamente le installazioni degli artisti. Il contenuto allestitivo è sempre più transitorio, con un continuo rinnovamento di mostre, esposizioni temporanee e itineranti: una questione che riguarda oggi l'organizzazione di quasi tutti i musei" (Peressut L. Basso, 2015).

Lo spazio museale è sempre di più ambiente scenografico e comunicativo. Le strategie di coinvolgimento attivo del visitatore si basano su dispositivi immersivi, personalizzati, sensoriali e touch, che lo hanno portato ad essere protagonista. Si parla di realtà virtuale immersiva, con la quale riprodurre ambienti, architetture, città e situazioni esistenti o esistenti in natura, ma anche immaginazioni di mondi fantastici, fantasiosi, mitologici con l'obiettivo di creare conoscenza attraverso esperienze sensoriali. Linguaggi differenti si integrano, trovano nel mondo delle tecnologie di ultima generazione uno strumento utile per comunicare contenuti in maniera precisa, rapida e coinvolgente. Le nuove tecnologie possono connettere musei spazialmente lontani, ricostruire la globalità di un'opera a partire da frammenti, scoprirne il colore originario, collocare geograficamente i reperti nel loro luogo sito di origine, anche in ambienti tridimensionali.

L'allestimento per lo *Chopin Muzeum* di Varsavia (Polonia, 2010) di Ico Migliore e Mara Servetto, contenente la più grande collezione "Chopiniana" al mondo con oltre 5.000 pezzi sull'opera e la vita del grande compositore, è stato concepito per creare diversi "emotional landscapes" che catturano l'attenzione e la curiosità del visitatore, per superare il primo livello possibile di interpretazione dei contenuti attraverso la stimolazione di tutti i sensi.

La leggerezza del sistema espositivo collocato all'interno dell'Ostrogski Castle, un complesso storico edificato nel 1600, disegna una compresenza di differenti percorsi tematici e interagisce con un sistema aperto di approfondimento, di zoom dei contenuti esposti che invitano a "toccare", ad interagire con i sistemi espositivi.



Il progetto di Mario Bellini per l'allestimento del *Museo della Storia* di Bologna a Palazzo Pepoli (Bologna, Italia 2012) è basato su una importante impronta virtuale: oltre a sale allestite in modo tradizionale, il museo offre spazi di forte impatto comunicativo. L'ambiente più evocativo del museo è una galleria multimediale dedicata alla storia dei canali artificiali che rifornirono Bologna dell'acqua necessaria alle sue attività produttive, ed in particolare, a partire dal

XIII secolo, alle molte seterie sorte nel cuore stesso della città. La forma di questo spazio richiama quella di un canale voltato, l'impatto visivo è reso ancora più forte dalla tessitura

12. Museo della Storia Palazzo Pepoli, Bologna foto @ Marco Masocco

geometrica luminescente applicata alle pareti. Un video interattivo, proiettato a pavimento, reagisce ai movimenti del visitatore evocando la presenza di un corso d'acqua, mentre le pareti si rivelano essere in realtà degli specchi sui quali alcuni video, che descrivono la storia dei canali Bolognesi. Tra le sperimentazioni di questo tipo di successo l'intervento di valorizzazione delle *Domus romane di Palazzo Valentini* a Roma (Italia, 2010) curato da Piero Angela, Paco Lanciano e Gaetano Capasso, dove il visitatore vede "rinascere" strutture murarie, ambienti, peristili, cucine, terme, decorazioni e arredi, testimonianze del passato narrate attraverso ricostruzioni virtuali, effetti grafici e filmati e il *Museo Archeologico Virtuale di Ercolano, MAV* (Napoli, Italia 2008), uno dei primi musei archeologici che, con ricostruzioni scenografiche, interfacce visuali e ologrammi restituisce al visitatore aspetti della quotidianità nell'antichità. Nell'*Imperial War Museum* di Londra (UK, 2014) di Foster + Partners è chiara la volontà degli autori di mediare il rapporto tra fisicità e virtualità, il racconto museale intreccia oggetti grandi e piccoli con i contenuti multimediali, le narrazioni audio di racconti personali sono accompagnati da oggetti fisici per creare un impatto complessivo realistico, non solo attraverso l'utilizzo dei dispositivi tecnologici.

3.3 Musei e paesaggi culturali

Quando l'arte esce dal museo, lo spazio urbano rappresenta una delle declinazioni del cosiddetto paesaggio culturale, interessato, nella sua totalità, da questo processo di diffusione dell'arte in spazi eterogenei. Si tratta di una fase molto attuale del processo di evoluzione del museo, testimoniata anche dall'attenzione riposta su questo tema all'interno della 24^a Conferenza Generale dell'ICOM, International Council of Museums, conclusa da poco a Milano e che ha avuto come tema centrale "*Musei e paesaggi culturali*". In questo senso nel 2014 ICOM Italia, Il Comitato Nazionale Italiano aveva avviato un censimento dei musei che si sono occupati e si occupano attivamente di paesaggio o che hanno promosso e promuovono attività legate al paesaggio culturale. Il censimento ha individuato:

- *musei e centri d'interpretazione del paesaggio*: in cui la conoscenza, la documentazione e l'interpretazione del paesaggio costituiscono la missione stessa del museo;
- *musei diffusi, musei del territorio e della città, ecomusei*: la cui attività è prevalentemente dedicata al

patrimonio diffuso e include la conoscenza e l'interpretazione del paesaggio;

- *musei naturalistici*: che affiancano stabilmente l'interpretazione delle loro collezioni con attività nel territorio o sul campo;

- *musei e parchi archeologici*: che costituiscono in sé stessi un paesaggio o in cui il rapporto fra museo e siti di provenienza dei reperti dà luogo a percorsi espositivi a cielo aperto;

- *case-museo*: che sono proposte come punto di partenza per percorsi artistici, letterari, musicali, legati alla figura protagonista della Casa-museo;

- *mostre o allestimenti sul paesaggio*: in cui è messa in evidenza la relazione fra le opere esposte (dipinti e/o fotografie) nel museo e i paesaggi che in esse sono raffigurati;

- *forme di Land Art*: dove l'arte contemporanea è esposta a cielo aperto o costituita da opere site-specific prodotte con l'obiettivo di creare nuovi paesaggi (in questo senso, va richiamato almeno il lavoro di Alberto Burri per il Cretto di Gibellina vecchia, realizzato in Italia tra il 1984 e il 1989, e le continue sperimentazioni di Christo, fino all'ultima installazione realizzata nel 2016 nel Lago d'Iseo);

- *progetti di valorizzazione del patrimonio culturale e del territorio*: realizzati attraverso itinerari, visite guidate, passeggiate, ciclo-percorsi, attività educative, mostre, conferenze, pubblicazioni, festival, sagre, veglie, rievocazioni storiche, eventi (<https://icom-musei-paesaggiculturali.cineca.it/musei-e-paesaggi-culturali-2015/#museiculturali>).

Tra questo tipo di iniziative il *PAV Parco Arte Vivente* di Torino (Italia 2008) e nel *PAC Porto di Arte Contemporanea* di Acciaroli (Italia 2015) e il progetto *Tracce in luce*, un lavoro di valorizzazione della Rocca del Vignola a Modena (Italia 2015).

3.4 Museums after Museums

Le straordinarie potenzialità offerte oggi dalle tecnologie informatiche, a partire dalla multimedialità, dalle digitalizzazioni e ricostruzioni 3D, applicazioni per smartphones, computer graphics, fino alle più recenti tecnologie di rilevazione del movimento per l'interazione fra uomo e computer, quali Leap Motion, OculusRift, realtà aumentata su Multi Device, Natural Interaction, sono strumenti straordinari per accelerare la diffusione della conoscenza e per veicolare i contenuti culturali, e che hanno ancora una volta profondamente cambiato il modo di comunicare del museo. Con l'avvento dell'era digitale l'influenza delle tecnologie informatiche nel settore dei beni culturali ha prodotto una trasformazione dei modelli e metodi di trasmissione del sapere. Per esempio grazie alle tecnologie digitali la figurazione e la percezione del passato è cambiata radicalmente, l'interattività ci permette di percorrere spazi antichi che non esistono più o che non sono agibili e soprattutto mettono in atto un sistema di apprendimento molto potente che ha a che fare con la percezione, con i nostri stimoli sensoriali e con l'azione, rispetto a quelli più tradizionali e meno efficaci come l'astrattismo di parole e simboli.

Quello del museo oggi è principalmente un tema urbano e il problema che si pone è quello di un ambiente non solo costruito, ma immateriale dentro e fuori gli spazi del contenitore architettonico. L'espressione "funzione espositiva" si allarga così dal suo ruolo fisico e propone una evoluzione verso un "sistema integrato di comunicazione". Una forma di sradicamento che porta ad abitare virtualmente nella rete digitale e allo stesso tempo vivere la dimensione pluridimensionale di spazi complessi. Una modalità che nel museo era già stata ideata nel secolo scorso. E gli esempi non mancano se negli anni Settanta Richard Rogers e Renzo Piano avevano progettato per il *Centre Pompidou* uno schermo interconnesso alla facciata dell'edificio e alcuni solai mobili, per mutamenti espositivi e per spazi eventi, che poi non vennero realizzati. Sul tema degli allestimenti cambia il rapporto tra esposizione, museo e utenti, anche con l'avvento del

digitale e del virtuale e si apre una ricerca su come si pongono gli allestimenti fisici, le teche, i contenitori nei confronti del mondo nuovo dei fruitori del terzo millennio. Le mostre sono presentazioni complesse che trasmettono concetti, oggetti in esposizione, e coinvolgono i sensi dei visitatori. Con la complessità della diversità del loro pubblico, i musei devono rivolgersi a differenti livelli di apprendimento, rispondere alle questioni di equità culturali e di genere, e offrire più livelli di informazioni. Obiettivi che se perseguiti correttamente rendono le esposizioni e le mostre più comprensibili e divertenti, certamente maggiormente connesse alla vita dei visitatori.

Nel mese di giugno di quest'anno la Fondazione Torino Musei, in collaborazione con la Singularity University Ginevra, ha organizzato una conferenza dedicata all'analisi degli scenari esistenti e alla visione sul futuro di ciò che, nei prossimi dieci anni, accadrà alle esperienze museali e come queste influiranno direttamente sulle componenti sociali ed economiche della società, in un contesto di profonde mutazioni, sovvertimento dei concetti di arte e scienza e quarta rivoluzione industriale.

Dai vari tavoli di lavoro sono emersi scenari che delineano nuove frontiere di ricerca entro le quali si sperimenteranno nuove forme di comunicazione per consentire a differenti visitatori di accedere ad ogni tipo di museo. Nuove interfacce tecnologiche saranno dedicate all'uso dei gesti nella realtà aumentata in un sistema culturale nel quale lo *storytelling*, le neuroscienze e l'intelligenza artificiale potranno espandere l'immaginazione degli utenti per vivere sollecitazioni non solo percettive, ma anche fisiche. E l'innovazione tecnologica influirà in futuro sulla stessa configurazione architettonica dei musei, i quali popolati di spazi sensibili diverranno piattaforme creative capaci di stimolare la partecipazione, l'educazione e l'interazione tra l'opera d'arte e il visitatore che così diventa protagonista.

E già si affacciano tendenze, nuove opportunità di carriera e possibilità di business sostenibili che riguarderanno l'innovazione nel saper fare da parte degli artigiani del digitale, i Fab Makers, i quali lavoreranno in quelli che saranno dei veri e propri *Lab-Museums*.

La conferenza esplora così il complesso delle nuove prospettive grazie alle quali "viene aperta la scena ad un museo universale, un database condiviso e open data di opere d'arte, in cui le collezioni vengono riordinate e presentate rispondendo ai bisogni dell'utente, sia su postazioni fisse che mobile, sia con l'uso di strumenti tecnologici che mixano la realtà aumentata e virtuale. Tecnologie olografiche permetteranno di esplorare le opere del museo nelle loro stratificazioni storiche e di significato."

Prendono sviluppo i vari tipi di tecnologie mobili utilizzate nei musei, e si esplorano alcune delle nuove applicazioni ora possibili. Se consideriamo l'ultima generazione di tecnologie portatili e di connessione, come i sistemi di *location-aware*, *computer vision* e *realtà aumentata*, comprendiamo il ruolo del museo in un ambiente multiplatforma dove il rapporto del museo con un pubblico globale dovrebbe evolversi in modo da riflettere la struttura di rete distribuita da Internet stessa.

Le stesse vetrine sono diventate sistemi complessi, dinamici, "smart". Perfezionate le prestazioni tecnologiche e quindi superata la primaria funzione di contenitore di oggetti di valore per proteggerli e mostrarli, gli espositori contemporanei interagiscono con il visitatore a cui non basta più vedere un gioiello antico o un'anfora romana, perché vuole conoscere, immaginare il processo che li ha creati, le vicende che li hanno modificati, le persone del passato che li hanno indossati o utilizzati, dando spazio all'immateriale, all'immaginario, all'invisibile.

Tutto questo provoca degli effetti sulla progettazione degli organismi architettonici e degli spazi espositivi, generando il rischio di una migrazione dalle necessità della conservazione ed esposizione efficace di oggetti e reperti, alle esigenze degli aspetti mediatici che molti musei enfatizzano, allo scopo di catturare l'attenzione dei visitatori e la ribalta internazionale. E così negli allestimenti, nelle vetrine, negli espositori, l'uso di materiali costruttivi innovativi, o forse di moda, siano essi plastici, metallici o compositi, non deve

contravvenire alle regole della corretta funzionalità strutturale, formale e di sicurezza che ha contraddistinto soluzioni più tradizionali, del recente passato.

Sono questi i temi di frontiera della ricerca scientifica che il *Built Heritage Lab* dell'ITABC del CNR sta sviluppando con il progetto *MAM Museum After Museum*, per immaginare e studiare il museo che verrà, come architettura-spazio-fisica aperta, attrezzata con sistemi allestitivi fluidi, illuminazione smart, equipaggiamenti espositivi flessibili, integrati a piattaforme di comunicazione virtuale -digitale per fornire conoscenza e indurre esperienze immersive e interattive per i visitatori. Un modello tratteggiato dalla recentissima mostra "Time is Out of Joint" allestita dalla Galleria Nazionale d'Arte Moderna di Roma, nella quale anche la nozione del tempo che scandisce le epoche artistiche, i personaggi e le opere viene scardinato, cosicché il " museo può presentarsi come spazio di una temporalità di ordine diverso, luogo di scoperta, aperto alla ricerca e alla contemplazione e spazio di riflessione sui linguaggi, sulle pratiche espositive e sul ruolo del museo contemporaneo".

All'interno di questo ambizioso percorso di studio, un tema centrale sarà il rapporto tra un Museo sempre più Smart e la città storica italiana ed europea anch'essa proiettata verso un futuro Smart, nel quale il museo non si propone come tipologia di edificio circoscritto, ma come *machine à voir* non solo espositiva ma produttrice di cultura, che si estende nella città attraverso percorsi e isole della conoscenza, strade, piazze, fronti urbani. E allora quasi certamente, a conclusione di questa ricerca, ci si troverà sospesi ad interrogarsi dinanzi al dilemma se l'idea fondante di questo viaggio scientifico sarà stato il " museo e la città" oppure " Il museo è la città".

Bruna Di Palma ha contribuito alla redazione dei paragrafi: 1.1., 1.2., 2.3.,2.4., 3.1

Bibliografia

- AA. VV., *73 MUSEI*, 2007, Edizioni Lybra Immagine, Milano
- Ago F., 2008, *Il mondo del museo oggi*, Felci, Pisa
- Area, nov.-dic. 2002, 65, n. monografico *Esporre*, Milano
- Aloi R., 1962, *Musei. Architettura-Tecnica*, Hoepli, Milano,
- Antinucci F., 2004, *Comunicare nel museo*, Laterza, Roma-Bari
- Balboni Brizza M.T. 2007, *Immaginare il museo. Riflessioni sulla didattica e sul pubblico*, Jaca Book, Milano
- Boralevi A., Pedone M. (a cura di), 1995, *Luisa Becherucci. Lezioni di museologia: 1969-1980*, UIA Firenze
- Brawe M., 1965, *Il museo oggi*, Edizioni Comunità, Milano
- Breschi A. (a cura di), 2005, *MuseiNonSolo*, Alinea Editrice, Firenze
- Bodo S., 2003, *Il museo relazionale. Riflessioni ed esperienze europee*, Fondazione Agnelli, Torino
- Bucci F., Rossari A. (a cura di), 2005, *I musei e gli allestimenti di Franco Albini*, Electa, Milano
- Caliari P. F., 2003, *Museografia. Teoria estetica e metodologia didattica*, Alinea Editrice, Firenze
- Ciarcia Saverio, 1998, *Allestimento museale. Questioni di dettaglio*, CLEAN, Napoli
- Cataldo L., Paraventi M., 2007, *Il museo oggi. Linee guida per una museologia contemporanea*, Hoepli, Milano
- Cataldo L., 2011, *Dal museum theatre al digital storytelling. Nuove forme della comunicazione museale fra teatro, multimedialità e narrazione*, Franco Angeli, Milano
- Cimoli A. C., 2007, *Musei effimeri, Allestimenti di mostre in Italia 1949-1963*, Il Saggiatore, Milano
- Ciorra P., 2006, *Il futuro dei Musei. Museums next generation*, Electa, Milano

- Clemente P., 2004 *Museografia e comunicazione di massa*, Aracne, Roma
- Cocchitto G.F. 1985, *La conservazione nei musei : questioni relative a: illuminazione, microclima, sicurezza antincendio, sicurezza antifurto*: Regione Toscana, Firenze
- Cristallini E. (a cura di), 2008, *L'arte fuori dal museo*, Gangemi Editore SpA, Roma
- Dalai Emiliani M. 2008, *Per una critica della museografia del Novecento in Italia. Il "saper mostrare" di Carlo Scarpa*, Marsilio, Venezia
- Fonti D., Caruso R. (a cura di), 2012, *Il museo contemporaneo. Storie esperienze competenze*, Gangemi, Roma
- Greub S., Greub Th. (a cura di), 2006, *Museums in the 21st century. Concepts, projects, buildings*, Ed. Prestel, München
- Huber A., 1997, *Il museo italiano. La trasformazione degli spazi storici in spazi espositivi. Attualità dell'esperienza museografica degli anni '50*, Lybra Immagine, Milano
- Jodidio P., 2010, *Architecture now! Museums*, Taschen, Cologne
- L'architetto italiano, giugno-luglio 2006, 14, n. monografico *Speciale musei*
- Lugli A., 1992, *Museologia*, Editoriale Jaca Book, Milano
- Malagugini M., 2008, *Allestire per comunicare. Spazi divulgativi e spazi persuasivi*, Franco Angeli, Milano
- Marani P.C., R. Pavoni, 2006, *Musei. Trasformazioni di un'istituzione dall'età moderna al contemporaneo*, Marsilio, Venezia
- Marini Clarelli M. V., 2005, *Che cos'è un museo*, Carocci, Roma
- Mazzi M. C., 2005, *In viaggio con le muse. Spazi e modelli del museo*, Edifir, Firenze
- Mottola Molino A., 1992, *Il libro dei Musei*, Allemandi, Torino
- Menegazzi C., Silvestri I. (a cura di), 2003, *La conservazione preventiva delle raccolte museali. Atti del convegno, 1999*, Nardini, Firenze
- Message, K 2006, *New Museums and the Making of Culture*, Berg Publishers, Oxford, U.K. and New York
- Minissi F., 1983, *Il museo degli anni '80*, Edizioni Kappa, Roma
- Molino A.M., 1991, *Il libro dei musei*, Allemandi, Torino, ,
- Molino A.M., 2004, *L'etica dei musei*, Allemandi, Torino
- Monestiroli A., 2016, *Una pagina su... Trentasei progetti di architettura*, Lettera Ventidue, Siracusa
- Nardi E., 2004, *Musei e pubblico. Un rapporto educativo*, Franco Angeli, Milano
- Neickel C. F., 2005, *La museografia. Guida per una giusta idea ed un utile allestimento dei musei*, CLUEB, Bologna
- Neickel C. F., 2005, *La museografia. Guida per una giusta idea ed un utile allestimento dei musei*, CLUEB, Bologna
- Pansini S., 2004, *Museo e Territorio. Interpretazioni e uso dei beni culturali*, Progedit, Bari
- Pasetti A., 1999, *Luce e spazio nel museo d'arte. Architettura e illuminazione*, Edifir, Firenze
- Pastor V., Los S., Tubini U. (a cura di), 2011, *Arrigo Rudi. Architettura, restauro e allestimento*, Marsilio, Venezia
- Peressut L.B., 1999, *Musei. Architetture 1990-2000*, Federico Motta Editore, Milano
- Peressut L.B., 2005, *Il Museo Moderno. Architettura e museografia da August Perret a Louis Kahn*, Edizioni Lybra Immagine, Milano
- Peressut L.B., Bosoni G., Salvadeo P., 2015, *Mettere in scena. Mettere in mostra*, Lettera Ventidue, Palermo
- Piva A., 2004, *Il museo: la coscienza lucida dell'ambiguità*, Edizioni Lybra Immagine, Milano
- Polano S. (a cura di), 2000, *Mostrare. L'allestimento in Italia dagli anni Venti agli anni Ottanta*, Lybra, Milano
- Poli F., 2011, *Il sistema dell'arte contemporanea. Produzione artistica, mercato, musei*, Laterza, Roma-Bari

- Polveroni A., 2007, *This is contemporary. Come cambiano i musei d'arte contemporanea*, Franco Angeli, Milano
- Poulot D., 2005, *Musée et muséologie*, Éditions La Découverte, Paris. (ed. it., Bortolini A.C. (trad.), 2008, *Musei e Museologia*, Jaca Book, Milano)
- Pratesi L. (a cura di), 2006, *I musei d'arte contemporanea in Italia*, Skira, Milano
- Prete C., 2005, *Aperto al pubblico. Comunicazione e servizi educativi nei musei*, Edifir, Firenze
- Purini F., Ciorra P., Suma S. (a cura di), 2003, *Dentro il fuori. I musei dall'iperconsumo al racconto metropolitano*, C. Lindbergh, Roma
- Ranellucci S., 2005, *All'estimato museale in edifici monumentali*, Edizioni Kappa, Roma
- Ruggieri Tricoli M. C. (a cura di), 2000, *I fantasmi e le cose. La messa in scena della storia nella comunicazione museale*, Edizioni Lybra Immagine, Milano
- Schaer R., *L'invention des musées*, 1993, Gallimard Paris. (ed. it., Buyschaert M. (a cura di) 1996, *Il museo tempio della memoria*, Einaudi-Gallimard, Trieste)
- Tomea Gavazzoli M. L., 2004, *Manuale di museologia*, Etas, Milano
- Vercelloni V., 1994, *Museo e comunicazione culturale*, Jaca Book, Milano
- Vivio B. A., 2010, *Franco Minissi. Musei e restauri. La trasparenza come valore*, Gangemi Editore, Roma
- Zerbini L. (a cura di), 2006, *La didattica museale*, Aracne, Roma
- Zevi B., 1955, *Polemiche nel museo*, in L'Espresso, sezione Cronache, 17 maggio, Roma
- Zuliani S., 2006, *Il museo all'opera. Trasformazioni e prospettive del museo d'arte contemporanea*, Mondadori, Milano

I materiali artistici nelle vetrine museali

Antonio Sansonetti

Istituto per la Conservazione e valorizzazione dei Beni Culturali.
Consiglio Nazionale delle Ricerche

Introduzione.

Percorrendo le sale di esposizione dei musei, si è portati ad ammirare i contenuti artistici e storici degli oggetti esposti. E' meno frequente che il visitatore si ponga delle domande su come l'oggetto è fatto e sui materiali dei quali è costituito; eppure questi due aspetti offrono una panoramica di incredibile varietà e di molteplici interessi, ed inoltre essi hanno molta influenza sugli aspetti conservativi, e quindi su come l'oggetto che si ammira è giunto fino ai nostri giorni. L'insieme dei materiali che si possono incontrare in una ideale passeggiata nelle collezioni pubbliche e private di tutta Italia, contiene un campionario pressoché completo e comprensivo di qualunque materiale, sia naturale, sia artificiale, che sia mai stato usato nel corso della storia della umanità. Volendo partire da qualcosa di matericamente semplice, ci si immagina di fronte ad una statua di marmo bianco statuaria, un esempio raro di un manufatto costituito, in prima approssimazione, da un unico materiale; proseguendo l'ideale passeggiata nel museo immaginario, comprensivo di ogni tipo di manufatto, ci si imbatterebbe subito in un dipinto. La complessità materica è invece qui massima, partendo dal supporto che può essere costituito da una tavola di legno, da una tela di tessuto o da un assemblaggio dei due, oppure da una lastrina di rame o di avorio, da un foglio di carta o di cartoncino, da una lastra di terracotta, oppure ancora da un materiale moderno come è la masonite¹; nella stratigrafia consueta il dipinto prosegue in genere con diversi strati di preparazione, che possono essere molto sottili o appena più accentuati (in generale fino a qualche frazione di millimetro) e composti ad esempio di gesso e di colla di coniglio². Si perviene infine ai veri propri strati pittorici, tipicamente dello spessore di qualche decina di micron, che sono quelli cui è demandata la funzione espressiva; sono costituiti da una miscela di particelle di pigmento molto fini e di una sostanza in origine fluida e stendibile, su cui interviene in seguito un meccanismo di presa o asciugamento che procede per evaporazione del solvente o attraverso una reazione di polimerizzazione. A questa ultima

1

- La masonite è un materiale, usato anche come supporto per dipinti e costituito da fibre di legno trattate con vapore e pressate.

2

- La colla di coniglio è un materiale proteico prodotto bollendo la pelle di coniglio in acqua e raccogliendo la frazione idrosolubile in piccole perle (dopo essiccazione).

sostanza si attribuisce il nome di legante, ed ha appunto la funzione di aggregare tra loro le particelle di pigmento in uno strato coeso e ben aderente al substrato. La complessità materica e compositiva di un manufatto così descritto è molto alta e sfugge completamente a chi ammira il rosso del Manto della Vergine nella pala dell'*Assunta* dei Frari di Tiziano oppure il verde che veste il personaggio che accoglie gli ospiti nella *Cena in Casa di Levi* di Paolo Veronese. Eppure tutto concorre a formare e a tenere in vita quella meraviglia che ci colpisce, e che ha indotto gli storici dell'arte a usare fiumi di inchiostro. Tra questi due estremi, il più semplice e il più complesso, stanno infinite situazioni intermedie. I materiali che incontriamo più diffusamente nei musei sono quindi costituiti di pietre naturali, di materiali lapidei artificiali (stucchi e materiali ceramici), di metallo, di vetro, di carta, di legno, di fibre tessili; sono più rari, ma pur sempre ben rappresentati gli avori e l'osso, la tartaruga, le pelli e la pergamena, il corallo. Se ci si rivolge poi alla produzioni più recenti abbiamo una serie infinita di materiali di sintesi polimerici, come le materie plastiche. Non mancano poi esempi bizzarri: nel Museo Archeologico Nazionale di Napoli sono conservate focacce e pani carbonizzati che furono ritrovati nelle botteghe di Ercolano; arrivando all'arte moderna e contemporanea basterebbe ricordare la famosa opera surrealista *Tazza di Pelliccia* di Meret Oppenheim del 1936; Marc Quinn un artista nato nel 1964, e appartenente al gruppo dei *Young British Artist*, ha realizzato una serie di busti autoritratto, utilizzando il proprio sangue congelato, conservati in condizioni di bassa temperatura; Damien Hirst, tra i più quotati artisti a livello internazionale ha prodotto a partire dal 2003 una serie di opere denominate *Kaleidoscope paintings* e realizzate accostando tra loro migliaia di ali di farfalla. Sono solo pochi esempi per dare l'idea del vero e proprio paradiso di varietà che aspetta lo studioso di materiali, all'interno dei musei.

Impostazione del lavoro e scelta metodologica.

Il testo che segue è stato organizzato rispondendo ad un criterio di classificazione materica. Per ragioni di spazio questo testo non ha l'ambizione di trattare sistematicamente l'argomento ma, se mai, si pone lo scopo di dare una idea preliminare al lettore riguardo alla complessità dell'argomento e alle implicazioni conservative che questa complessità comporta. Le varie classi di materiali si possono trovare accostate in collezioni molto differenti tra di loro. Un esempio è fornito dalle collezioni archeologiche od etnografiche, che raccolgono i materiali più differenti, spesso di provenienza esotica. La stessa considerazione vale per molte delle collezioni di musei storici che raccolgono documenti e testimonianze di periodi del passato, costituiti di materiali di vario genere. Al contrario esistono collezioni di tipo specialistico come alcune collezioni dedicate al tessile o al costume oppure ai manufatti ceramici, dove la variabilità dei materiali è tutta interna ad una determinata classe qui considerata.

I materiali vengono trattati illustrando sinteticamente le loro provenienze e le tecniche di produzione. Inoltre le principali proprietà dei materiali che vengono prese in considerazione nel testo riguardano la loro composizione chimica, le caratteristiche microstrutturali e tessiturali e le proprietà fisiche e fisico/meccaniche. Questo insieme di caratteristiche ha grande influenza su ciò che nella comunità scientifica che si occupa di

conservazione viene definito *durabilità*. Lo stato di conservazione di un manufatto dipende in primo luogo dalle sue caratteristiche di durabilità e poi dalla sua storia conservativa, ossia dall'insieme degli eventi di interazione tra i materiali che costituiscono il manufatto, l'ambiente di conservazione e gli interventi che si sono succeduti. E' quindi di cruciale importanza individuare le corrette condizioni di conservazione per un materiale conservato in un museo, soprattutto per quanto concerne temperatura ed umidità relativa, interazione con la radiazione elettromagnetica, con gli agenti ambientali e con gli inquinanti. La presenza di elevati livelli di umidità innesca la cosiddetta malattia del bronzo, produce deformazioni nell'avorio e nell'osso, e induce fenomeni di trasporto nei sali solubili eventualmente presenti in un corpo ceramico o in un materiale lapideo naturale. E' quindi piuttosto problematico individuare corrette condizioni per un manufatto polimaterico che assembla in se materiali eterogenei dal punto di vista conservativo: bisogna considerare infatti il diverso comportamento proprio di ogni materiale, ad esempio per quanto concerne i coefficienti di dilatazione termica oppure i valori di assorbimento di umidità dall'ambiente.

Anche un ambiente eccessivamente secco può non essere adatto alla conservazione, in special modo se sono coinvolti materiali organici in fibra o tessuti come il cuoio. E' quindi necessario considerare le fonti di illuminazione diretta, l'intensità stessa della radiazione, la vicinanza con le sorgenti di calore.

Con l'avanzare del degrado un materiale accentua la propria sensibilità agli agenti esterni e soprattutto alle variazioni termo-igrometriche e quindi si può affermare che le cinetiche del degrado in genere si velocizzano con l'età del manufatto.

Nei paragrafi che seguono verranno trattate le classi di materiali più diffuse nelle produzioni artistiche partendo dai materiali che si incontrano più frequentemente e proponendo infine materiali più rari e curiosi.

1. Metalli e leghe metalliche: metalli preziosi; bronzi e ottoni; peltri; il ferro e le sue leghe.

I metalli sono utilizzati normalmente in forma di lega; anche l'oro, metallo nobile per eccellenza e quindi non soggetto a corrosione, viene in genere utilizzato in lega con rame o argento dal momento che in forma pura non possiede sufficienti proprietà meccaniche. Fanno eccezione alcuni manufatti archeologici, soprattutto di produzione indiana.

Il più importante problema di conservazione dei metalli di cui tenere conto è la corrosione; questo processo indica una lenta e continua consumazione naturale ed irreversibile di un materiale. La corrosione è un fenomeno di natura elettrochimica che determina una interazione chimico-fisica del materiale metallico con l'ambiente che lo circonda; essa può essere definita come un processo di degrado per il quale gli elementi metallici si combinano con sostanze presenti nell'ambiente (ossigeno ed acqua): i prodotti di corrosione sono più stabili energeticamente nelle condizioni ambientali di conservazione date, per cui i metalli tendono ad trasformarsi in una delle forme più stabili presenti in natura, usualmente quelle di ossido, di ossido idrato, di idrossido, di carbonato o di solfato. Viene quindi indotta la formazione di prodotti di corrosione che si

accregono sulla superficie del metallo dando origine a patine di spessore variabile da qualche decina di micron a qualche millimetro. Le patine di corrosione si distinguono dal metallo sottostante sia per colore che per consistenza. Tipiche sono le patine rosso-arancio nel caso di leghe ferrose o quelle verdi su bronzi. Se questo processo prosegue nel tempo con andamento canceroso, il metallo ne è sempre più interessato in profondità. Per alcuni metalli al contrario questo processo si arresta dopo una fase iniziale ed i prodotti di corrosione stessi proteggono il metallo sottostante. In questo caso si parla di passivazione. Se, al contrario, la corrosione prosegue si ha come conseguenza il peggioramento delle caratteristiche meccaniche o delle proprietà fisiche del materiale inizialmente coinvolto.

Sebbene il termine corrosione sia spesso associato ai metalli, anche molte altre tipologie di materiali possono esserne coinvolti, con meccanismi chimici differenti.

I manufatti metallici che sono soggetti alla corrosione da ossidazione possono essere realizzati in bronzo, ottone, piombo, ferro, ghisa, acciaio e argento. I casi conservativi possono essere particolarmente critici con oggetti di provenienza archeologica, per i quali il processo di degrado ha prodotto un indebolimento meccanico e spesso la corrosione comporta la perdita di molta parte del materiale allo stato metallico.

Tutti i materiali che costituiscono una vetrina museale o che, a scopi di conservazione, entrano in contatto con la superficie metallica non devono innescare meccanismi che portano ad un ambiente acido. Da questo punto di vista le patine di corrosione ed i prodotti di neoformazione, tenderanno a trattenere ulteriore particolato atmosferico che a sua volta, e a causa di comportamenti igroscopici, potrebbe innalzare il contenuto di umidità a contatto con la superficie, modificando localmente le condizioni di pH.

Questa rapida rassegna inizia da **oro** ed **argento** che sono stati utilizzati nel corso della storia delle arti per vasellame, medaglie e monete, gioielli. Si ricordano a titolo di esempio le collezioni del Museo Archeologico di Napoli che conserva i ritrovamenti di Ercolano, Pompei e Boscoreale, il Victoria and Albert Museum di Londra con eccezionali collezioni di argenti inglesi, il Museo de Oro di Lima con quanto rimane delle produzioni Incas e il Museo fiorentino che proprio dagli argenti prende il nome, pur conservando una ricca collezione di molti altri manufatti preziosi. Moltissimi sono poi i tesori delle Cattedrali in Europa, fondati in molti casi nel medioevo. L'oro è il metallo nobile per eccellenza ed ha affascinato l'uomo fin dalla preistoria per il suo colore e per la sua lucentezza metallica, che permane nel tempo a causa della sua inattaccabilità. Ciò è ben visibile anche in ritrovamenti naturali di oro nativo, come le pepite. E' possibile trovare anche l'argento in forma nativa; anch'esso è considerato un metallo nobile, ma mostra una evidente sensibilità soprattutto in presenza di composti solforati e di tracce di acido solfidrico, per cui si riveste di una sottile patina scura di solfuro di argento; il processo di corrosione avviene con basse cinetiche; al contrario l'argento è stabile in aria pura.

Il bronzo ha dato il nome ad una intera era. Trattando di materiali metallici, i manufatti di bronzo costituiscono la parte più importante per diffusione e numero; il bronzo è infatti uno dei materiali per eccellenza della statuaria di grandi e piccole dimensioni. Al Museo del Bargello di Firenze è celebre la collezione dei bronzetti rinascimentali. Molto

interessanti sono anche diverse collezioni di vasi rituali prodotti dalle antiche dinastie cinesi e oggi conservate in numerose collezioni nel paese d'origine e negli Stati Uniti.

Il **bronzo** può essere costituito da una lega binaria (rame e stagno) oppure ternaria dove è aggiunto il piombo. Il rame è di solito presente in tenori compresi tra il 70 e il 90%. La lega viene arricchita con stagno fino all'8-9%, al fine di conferire buone caratteristiche meccaniche e resistenza ai processi di corrosione; bronzi con maggiori tenori di stagno raggiungono livelli di durezza, per cui possono essere lavorati solo per fusione, la colabilità è una proprietà con la quale si designa l'attitudine di una lega a rispondere alle esigenze e alle pratiche delle tecniche di fonderia; la lavorabilità è invece relativa alle operazioni successive alla formazione del getto, quali possono essere martellatura, cesellatura, stampatura e trafilatura. il piombo è aggiunto in pochi punti percentuali (dall'1 al 5%) e migliora sia le proprietà di colabilità della lega fusa, che quelle di lavorabilità. Infatti il piombo, essendo insolubile nella matrice, rimane confinato ai bordi dei grani e riempie le cavità interdendritiche; ciò è molto importante nelle tecniche scultoree, quando la lega fusa viene colata in forme al fine di ottenere un prodotto finito senza difetti grossolani. Anche lo zinco è un importante elemento nella composizione dei bronzi. Possono essere poi presenti numerosi altri elementi (fosforo, manganese, alluminio, silicio, nichel, berillio, etc.) per la produzioni di bronzi con speciali caratteristiche, dove per esempio si punta ad aumentare la durezza del materiale.

I bronzi arsenicali furono prodotti soprattutto dalle antiche civiltà iraniane, a contatto con giacimenti dove l'arsenico è presente come impurezza nei minerali di rame, mentre i bronzi al fosforo (con tenori molto bassi inferiori all'1%) furono spesso preferiti all'ottone per le produzioni di strumenti musicali.

Speciali tecniche di finitura sono emerse gradualmente nel corso della storia delle tecniche artistiche con un periodo florido nella Francia del XIX secolo dove speciali trattamenti con prodotti chimici furono in grado di produrre patine artificiali di varia colorazione: la tavolozza varia da verdi pallidi, a varie tonalità dal bruno cioccolato al bruno/nerastro. Il grande scultore francese Auguste Rodin sperimentò tecniche innovative di patinatura e i suoi manufatti si possono ammirare nei musei a lui dedicati a Parigi e a Philadelphia.

L'**ottone** è una lega di rame e zinco utilizzata per produrre manufatti sia nelle produzioni artistiche che industriali. Per brevità si ricordano qui soltanto gli strumenti musicali che da questo materiale prendono il nome.

Il **peltro** è una lega molto malleabile dal basso punto di fusione (anche sotto i 250°C in funzione degli elementi addizionati). E' composta principalmente da stagno (tenore attorno al 90%), con l'addizione di altri elementi quali rame, bismuto e antimonio, piombo e argento; questi ultimi due elementi erano presenti soprattutto nelle leghe prodotte in antico e sono oggi non più utilizzati. In particolare il piombo poteva essere presente in percentuali importanti fino al 10/15%, ma si è smesso di utilizzarlo a causa della sua tossicità. Il peltro, di colore grigio caratteristico, è stato utilizzato soprattutto nei paesi del nord Europa e in Inghilterra dove le miniere di stagno della Cornovaglia furono sfruttate fin dalle epoche più antiche. Veniva utilizzato soprattutto per vasellame da tavola: gli oggetti si producevano colando la lega all'interno di stampi di altri metalli più resistenti meccanicamente, come ferro ed ottone. La lavorazione avveniva poi a freddo

per martellatura. Esistono produzioni artigianali anche al giorno d'oggi. Si segnala l'importante utilizzo dello stagno nelle canne di organo. Lo stagno resiste piuttosto bene all'umidità, ma è sensibile alla presenza di acidi e di basi. Comunque le leghe di peltro, non si ossidano facilmente, e tendono a mantenere nel tempo le caratteristiche cromatiche e tessiturali.

Il termine **ferro** è utilizzato per indicare una classe di materiali, che sono in realtà leghe a base di ferro con caratteristiche di resistenza meccanica e chimica non molto elevate: vengono anche detti acciai dolci. Si tratta del metallo più utilizzato nella storia dell'umanità ed oggi le leghe di ferro costituiscono circa il 95% della produzione di metalli nel mondo, delineando il profilo di economie molto sviluppate. Gli elementi che possono entrare in lega con il ferro sono molti tra i quali il manganese, il cromo, il vanadio, il nichel, il molibdeno, etc. Il più importante è però il carbonio, con il quale il ferro forma le note leghe ghisa ed acciaio. Si presume che i primi tentativi di usare il ferro e le sue leghe, abbiano sfruttato minerali contenuti nei meteoriti. Purtroppo molta parte delle produzioni più antiche non si è conservata a causa della facilità di corrosione di questo tipo di leghe. Sono celebri le produzioni Ittite e Sumere introdotte dal III millennio a.C. Il materiale veniva usato per oggetti di piccole dimensioni e soprattutto per punte di frecce o di lance.

La storia del ferro si intreccia fin da subito con quella delle sue leghe più comuni che sono appunto la **ghisa** e l'**acciaio**. L'acciaio è conosciuto fin dall'antichità e veniva prodotto in crogioli di piccole dimensioni. Sono noti alcuni frammenti rinvenuti in siti anatolici e databili a circa il 1800 a.C.; la civiltà cinese fu in grado di sfruttare il processo della tempra già alcuni secoli prima dell'era Cristiana; è però con gli Arabi nei secoli dell'alto medioevo, che si arriva a produzioni estremamente raffinate con l'acciaio che prende il nome dalla città di Damasco, di straordinarie proprietà molto apprezzate dai fabbricanti di armi bianche, come la capacità di mantenimento del filo. Possiamo considerare che i processi di produzione di acciaio in occidente, subiscano un impulso di innovazione e miglioramento nel XVII secolo, che porteranno attraverso la rivoluzione industriale ed il metodo cosiddetto Bessemer (dal nome del suo inventore), al materiale come oggi lo conosciamo.

Per quanto concerne le ghise si distinguono le produzioni in ghisa di prima e di seconda fusione. La ghisa di prima fusione, ancora impura, contiene dal 4 al 5% di carbonio ed è utilizzata come intermedio nella lavorazione di ghisa di seconda fusione e di acciaio. La ghisa propriamente detta (ghisa di seconda fusione) possiede un minore contenuto di carbonio (tra il 2 e il 3,5%) e basso contenuto di impurezze. Il materiale purificato fino a questi livelli possiede migliori qualità reologiche, molto importanti dal momento che certi manufatti possono essere prodotti colando la lega fusa all'interno di stampi. In questo modo, usando leghe con buone proprietà reologiche, era possibile ottenere dettagli decorativi ed un modellato complesso: la ghisa è un materiale duro e fragile e possiede punto di fusione tra 1150 °C e 1200 °C.

Gli acciai hanno contenuto di carbonio variabile nell'intervallo tra 0.1 e 1.6%. Con la crescita del tenore di carbonio si passa dagli acciai dolci ai semiduri ed ai duri. Gli acciai vengono lavorati in prevalenza per forgiatura. L'acciaio è stato usato nella produzioni di armi ed armature, ma anche di forzieri, cofanetti ed utensili di vario genere. Per quanto

concerne le armi sono particolarmente importanti le collezioni nazionali di Madrid e di Vienna (Kunsthistorisches Museum) e quella dell'Armeria Reale di Torino.

Il materiale è anche molto apprezzato da scultori contemporanei per la particolare capacità di modificare nel tempo le caratteristiche cromatiche e tessiturali. Esistono musei specializzati del ferro battuto ad Acqui Terme (AL) e a Feltre (BL), luoghi che hanno visto l'attività di abili artigiani.

Manufatti in **piombo** sono piuttosto rari, ma non ne mancano esempi. Il piombo presenta il vantaggio di una buona lavorabilità e può essere facilmente ridotto in lastre che poi possono essere lavorate a martello, e assemblate per costituire vari manufatti. In genere può presentare dei composti di corrosione bianchi, di composizione variabile in funzione dell'ambiente conservativo, ma costituiti soprattutto da anglesite (solfato di piombo).

Le tecniche decorative utilizzate sui manufatti metallici sono state molteplici nel corso dei secoli. Il metallo è stato lavorato con diverse lavorazioni meccaniche (sbalzo, battitura, incisione). La decorazione a smalto prevede di applicare una pasta vetrosa all'interno di alveoli o di incavi ricavati nella massa del metallo e di sottoporre poi a cottura in muffola il manufatto, in modo da fondere il vetro e farlo aderire alle pareti del metallo. In genere si tratta di manufatti preziosi che utilizzano come supporto oro, argento o rame. Se invece, all'interno di incisioni, si applica una miscela costituita in genere da altri metalli e da additivi che in cottura producono una colorazione nera e lucida la tecnica prende il nome di niello. Se infine nel solco delle incisioni viene battuto un filo di metallo a contrasto di colore si ottengono manufatti decorati secondo la tecnica dell'agemina. Per tutti questi materiali la costanza della temperatura è un dato essenziale dal momento che i diversi materiali strettamente a contatto tra di loro hanno coefficienti di dilatazione termica diversa. Si possono quindi facilmente verificare distacchi e cadute.

Fig. 1. Armature nella Sala 14 Del Castello Sforzesco di Milano.

2. Materiali lignei.

Il tessuto legnoso degli alberi è formato da cellule che si differenziano per funzioni. La parete della cellula è costituita da cellulosa e lignina. Il legno fresco è formato indicativamente da cellulosa (45%), emicellulosa (30%), lignina (circa 20%); il contenuto in estrattivi è molto variabile e maggiore nelle conifere (circa 5%). Inoltre il legno è un materiale idrofilo, come la cellulosa che lo costituisce. Le cellule possiedono una sagoma allungata e nel loro insieme formano fibre orientate lungo l'asse del fusto. Questa microstruttura è adatta a conferire proprietà di resistenza meccanica al legno, che funge da elemento di sostegno per la pianta. La struttura delle cellule sopravvive anche dopo l'abbattimento della pianta e crea un insieme poroso, con buone proprietà di elasticità. Il materiale ligneo è caratterizzato da una struttura costituita dagli anelli di accrescimento annui, ben visibili se si opera un taglio secondo una sezione trasversale rispetto all'asse. Oltre a questo in genere il legno possiede una serie di irregolarità nella struttura come cavità interne, nodi e soluzioni di continuità. Le dimensioni degli elementi lignei che vengono utilizzati hanno come limite massimo quelle del tronco da cui proviene il materiale. Per questo motivo il legno è in genere tagliato in assi che vengono poi

assemblate a formare manufatti di maggiori dimensioni. Le venature del legno così come i difetti possono essere apprezzati e costituire una texture o un pattern decorativo. Questo avviene soprattutto nelle produzioni contemporanee. Nelle opere antiche molto spesso il legno veniva rivestito con strati di finitura in modo da occultare la sua struttura a fibre ed i difetti. Ciò veniva attuato con vari materiali trasparenti o coprenti, incolori o colorati. Il legno poteva essere quindi dipinto, verniciato, laccato, dorato, cerato, ricoperto di tessuto o di lamine di materiali preziosi; è anche possibile colorarlo, facendolo bollire in olii coloranti o in estratti di erbe, e lasciare in vista il pattern delle venature che lo caratterizzano. Nel considerare gli aspetti conservativi di un manufatto ligneo è molto importante osservare la modalità con la quale esso è assemblato ed individuare il tipo di taglio che ha portato ai singoli elementi. E' infatti possibile ricavare singoli elementi lignei operando nel fusto della pianta molti diversi tipi di taglio, ad esempio secondo il raggio, oppure secondo la tangente. Il legno è un materiale anisotropo, cioè le sue proprietà dipendono dalla direzione lungo la quale vengono misurate. Un taglio radiale produce delle assi che sono simmetriche rispetto all'andamento degli anelli di accrescimento. Al contrario un taglio tangenziale mette in evidenza anelli che hanno un raggio di curvatura differente sulle due facce parallele della tavola. Questa asimmetria rende il taglio tangenziale molto più sensibile alle variazioni termo-igrometriche. La sua anisotropia rende conto del fatto che le tavole di legno tenderanno ad assorbire umidità dall'ambiente in modo diverso in funzione del taglio che le ha prodotte, e si dilateranno di conseguenza con coefficienti diversi. Dopo la stagionatura, la capacità dei materiali lignei di dilatarsi in funzione della umidità relativa dell'ambiente che lo circonda, rimane la stessa indipendentemente dall'età del manufatto. Il **legno** ha svolto un ruolo molto importante nelle vicende umane fin dai tempi più antichi, e territori diversi hanno fornito legni differenti. La costruzione degli strumenti più vari, di armi e di elementi di arredo, è sempre stata fortemente dipendente dalla disponibilità e dalla varietà di questa materia prima. Inoltre il legno non richiede l'uso di strumenti sofisticati per essere lavorato. Per limitarsi a qualche esempio erano costruiti in legno le strutture delle ruote, elementi costruttivi di grandi strutture come le navi, arredi domestici, le matrici per la stampa, molte parti di strumenti musicali e molti supporti per dipinti. E' anche possibile assemblare gli scarti delle lavorazioni lignee e produrre dei materiali compositi come il **compensato**, il **truciolare**, la **masonite**. Questi materiali più poveri, rispetto al legno cosiddetto massello, potevano essere rivestiti di sottili fogli (spessore tra 1 e 4 mm) di legni anche pregiati dette piallacci. I legni più adatti come materiali per la scultura sono quelli di media durezza come il noce, il cipresso, il tiglio e il pero. Molte sono le specie usate in ebanisteria: dal mogano al palissandro, dall'ebano al limone, dal sandalo all'ulivo, al bosso.

Le potenzialità del legno di essere lavorato sono molteplici e risultano funzione della sua compattezza e durezza. Come esempi di lavorazione si riportano la tornitura, l'intaglio e l'intarsio. Le tarsie lignee accostano lastrine sagomate di legni di vari colori che compongono poi un disegno di più grandi dimensioni. Alcune delle lastrine possono essere di avorio, di osso, di metallo, di madreperla.

Si è detto che il maggiore fattore di degrado dei manufatti in legno risulta dalle variazioni termo-igrometriche. Un alto contenuto di umidità produce attacchi di tipo biologico.

Molto importanti sono anche gli attacchi di insetti xilofagi oltre che le variazioni indotte dalla illuminazione diretta della luce solare, che producono imbrunimenti nel materiale. Hanno importanza anche altri materiali costituiti da fibre vegetali intrecciate oppure in corteccia. Manufatti di questo genere si trovano in collezioni etnografiche, archeologiche e storiche.

Fig. 2. Strumenti musicali lignei nella Sala 36 del Castello Sforzesco di Milano.

3. Materiali lapidei naturali ed artificiali

Molta parte delle collezioni museali è costituita da materiale lapideo naturale. Basti pensare che il marmo è, insieme al bronzo, il materiale per eccellenza della scultura classica, rinascimentale e barocca. I manufatti in materiale lapideo naturale molto spesso non sono esposti in vetrina. Questo avviene a causa delle loro notevoli dimensioni e a causa della loro relativa vulnerabilità. Non mancano comunque piccoli oggetti, statuette, lastre e rilievi. A volte i manufatti sono protetti dalle vetrine a causa della presenza di lacerti di finiture come policromie o dorature. I materiali lapidei si dividono in naturali ed artificiali. La serie delle Norme UNI Beni Culturali che si applicano ai materiali lapidei naturali ed artificiali indicano che come materiali lapidei naturali, siano da intendersi le rocce in opera, mentre fornisce alcuni esempi di materiali lapidei artificiali come malte, stucchi, laterizi ed i materiali ceramici. Nel presente testo questi ultimi saranno trattati nel paragrafo 4. Si tratta quindi in generale di materiali con una composizione inorganica costituita da minerali ed una microstruttura porosa. All'interno degli impasti con cui sono realizzati malte e stucchi possono essere presenti sostanze organiche, in genere in basso valore percentuale. I materiali lapidei naturali si possono a grandi linee dividere in carbonatici (marmi, calcari, dolomie) e silicatici (graniti, basalti, porfidi, quarziti, ardesie, etc.). Per quanto concerne malte e stucchi essi possono essere costituiti da un legante di calce aerea o idraulica che, dopo la presa, costituisce una composizione simile a quella di una arenaria a cemento carbonatico, oppure gessosa. Oltre che la composizione chimica e mineralogica, ha importanza nel definire la vulnerabilità di un materiale lapideo il suo grado di porosità. I materiali più durabili, quindi quelli che sono sottoposti ad una cinetica di degrado molto lenta, sono quelli che hanno una porosità molto bassa dell'ordine di pochi punti percentuali. Al contrario i materiali che presentano una porosità elevata sono meno durabili. Nel degrado dei materiali lapidei ha un ruolo importante l'interazione con l'acqua. Per quanto concerne il discorso che qui si affronta, il fenomeno che assume una certa importanza è quello delle condensazioni. L'umidità condensa quando incontra una superficie a temperatura più fredda. Se sono presenti gas come SO_2 , SO_3 , NO_x , CO_2 , H_2S , la superficie della pietra si trova in contatto con soluzioni acide con valori di pH nell'intervallo da 5,5 a 4, in funzione della concentrazione dell'inquinante. I materiali maggiormente sensibili sono quelli carbonatici che reagiscono in presenza di soluzioni acide. Al contrario i materiali silicatici sono molto resistenti e si può affermare che non subiscono danno rilevante da questo tipo di meccanismi. Se il materiale lapideo è poroso la condensa avviene in una zona superficiale e appena sotto la superficie. Le soluzioni penetrate nella porosità, possono essere trasferite verso l'interno della

microstruttura, sfruttando fenomeni di trasporto legati all'assorbimento capillare. Quindi oltre che il contenuto di pori in termini percentuale, conta anche la loro dimensione: in questo meccanismo più i pori sono piccoli e più risultano efficienti.

Nelle collezioni museale hanno una grande importanza manufatti che vanno sotto il nome di **gessi**, al punto che esiste un termine specifico che definisce questo tipo di collezioni: gipsoteche. I gessi sono stati prodotti come prototipi o intermedi di lavorazione di sculture il cui elaborato finale doveva essere in materiali considerati più nobili, come il marmo o il bronzo. Essi sono stati prodotti anche come materiali di studio, calcando una scultura esistente e realizzando una copia da fornire come esempio agli studenti delle Accademie di Belle Arti. Dal punto di vista conservativo questi materiali sono spesso protetti in vetrine, quando le dimensioni lo permettono, a causa del fatto che la loro superficie è ritentiva nei confronti della polvere. Si sporcano quindi facilmente con depositi che si accumulano soprattutto su superfici che possiedono uno sviluppo orizzontale. I metodi di pulitura sono spesso inefficaci od invasivi. Ricordiamo che il gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) è una sostanza mediamente solubile in acqua e quindi non possono essere usati metodi di pulitura che utilizzano acqua libera. Nell'impasto di stucchi e di gessi sono quasi sempre presenti aggregati minerali, anche se di solito in quantità inferiore rispetto ad una malta tradizionale. Ricordiamo anche che le vetrine esercitano una protezione nei confronti di questi materiali che sono fragili e non resistono agli urti. A titolo di esempio si ricordano le collezioni della Gipsoteca Canoviana di Possagno o quelle del museo Rodin di Parigi. Non mancano esempi di gessi patinati, in cui la superficie ha ricevuto una finitura spesso colorata e semilucida; in questo modo un materiale povero come il gesso arriva a simulare un materiale nobile come il bronzo.

4. Policromie

Le possibilità offerte dalle tecniche pittoriche sono molto vaste. Esse sono state utilizzate per decorare oggetti di arte applicata, così come nei dipinti più celebrati. Agli strati pittorici sono demandate importanti funzioni espressive. Possono decorare in parte oppure completamente la superficie di un oggetto. Oltre che nei dipinti veri e propri di piccolo o grande formato, su supporto tessile o su tavola lignea, oppure su supporto di altro materiale, le policromie sono state applicate su mobili, sculture, strumenti musicali, a margine di documenti, su utensili, su dettagli architettonici, su oggetti utilizzati nelle liturgie e l'elenco potrebbe essere ancora molto lungo. Generalmente l'impasto pittorico veniva preparato nella bottega dell'artigiano e conservato all'interno di vesciche di maiale, mentre i colori in tubetto fecero la loro comparsa verso il 1840. Uno strato pittorico è costituito da una fase legante e dal pigmento. La natura chimica del legante è varia. Può essere costituito da un **olio siccativo** (olio di lino, di noce o di papavero) da un **materiale proteico** (tradizionalmente tuorlo d'uovo, uovo intero, mentre raramente si è usato il solo albume) oppure latte o colla di tipo animale. Sono anche stati utilizzati leganti di tipo polisaccaride costituiti da gomme vegetali (gomma arabica) nella tecnica della gouache e dell'acquarello. La tecnica dell'encausto, non semplice da illustrare sinteticamente, utilizza leganti di tipo ceroso. Tipicamente uno strato pittorico ha spessori di qualche decina di micron. Il rapporto quantitativo tra legante e pigmento non è fisso,

ma dipende essenzialmente dall'effetto che si vuole ottenere: coprenza o trasparenza, maggiore o minore saturazione.

Un possibile strato di finitura di molti strati pittorici è realizzato verniciando la superficie dipinta. Le vernici costituiscono uno strato sottile e trasparente. Esse possono essere applicate sia con scopi di protezione, sia al fine di conferire particolari proprietà ottiche rendendo le superfici più o meno riflettenti. Applicando una vernice è quindi possibile ottenere una resa in termini di lucentezza o di opacità. Storicamente le vernici venivano preparate a partire da **resine naturali**: si tratta di essudati vegetali, maggiormente presenti nelle conifere e meno nelle latifoglie. La pianta le produce con scopi diversi, tra i quali vi è la funzione protettiva e preservante. Le resine possono effondere verso l'esterno da lacerazioni prodotte nella corteccia. Le lacerazioni possono essere prodotte naturalmente da animali oppure vengono intenzionalmente ottenute al fine di raccogliere le resine, come avviene nel caso del caucciù. La composizione chimica è complessa, ma si individua una preponderanza di sostanze appartenenti alla classe dei **terpeni**: si tratta di idrocarburi che rispondono alla cosiddetta regola isoprenica e che sono quindi multipli dell'isoprene (C_5H_8). La miscela naturale che compone le resine naturali è molto complessa e in genere contiene multipli dell'isoprene costituiti, nella maggior parte dei casi, da due a sei/otto unità isopreniche. I componenti più importanti sono riconducibili alla forma dell'acido abietico e dell'acido pimarico; i monoterpeni sono volatili insieme con i sesquiterpeni mentre i diterpeni sono poco volatili. Queste molecole multiple contengono sempre un certo numero di insaturazioni che derivano dai doppi legami presenti in origine nella molecola dell'isoprene. Sono proprio le insaturazioni che rendono il materiale sensibile alla luce, che ne costituisce infatti il maggiore fattore di deterioramento. Attraverso un meccanismo fotochimico di foto-ossidazione si producono cromofori e si osserva un ingiallimento. Alcuni esempi delle resine naturali maggiormente utilizzate nel corso della storia delle arti elenca dammar, mastice (dal *Pistacia lentiscus*), colofonia (da varie specie di pini), trementina (dal larice), elemi, sandracca, sangue di drago (da varie specie di dracene). La **gommalacca** riveste una particolare importanza in questo campo ed è l'unica resina naturale di origine animale. E' infatti prodotta dalla femmina di un insetto (*Kerria Lacca*) che vive nel sud est asiatico. Essa ha costituito uno dei prodotti principali sulla rotta della Compagnia delle Indie. Le resine naturali grezze appena raccolte sono in genere in forma di masserelle di piccole/medie dimensioni con una gamma cromatica dal giallo paglierino, all'arancio al bruno scuro. Quando invece sono stese in strato sottile la saturazione del colore è molto minore e risultano da quasi incolori ad arancio rossastro.

Se le resine naturali non vengono raccolte, possono subire un processo di seppellimento seguito da invecchiamento e da fossilizzazione. Da questo processo naturale vengono prodotte le copali e le ambre. Le copali hanno subito un processo di invecchiamento in genere di qualche secolo al massimo. Le ambre sono invece completamente fossilizzate. (vedi paragrafo 11). Le resine fresche sono insolubili in acqua ma solubili nei comuni solventi organici come alcol etilico o acetone. Le proprietà di solubilità le distinguono da altri essudati vegetali che sono le gomme naturali, a base polisaccaride e solubili in acqua fredda o calda in funzione del loro peso molecolare. Con il processo di invecchiamento le resine divengono progressivamente insolubili. E' questo un problema della massima

importanza nei problemi di pulitura delle superfici verniciate. Le copali sono in genere solubili in oli caldi.

Le resine venivano applicate fluide a pennello in fase di verniciatura finale. Se la resina è sciolta in un solvente organico come l'alcol etilico, il solvente evapora lentamente lasciando un film sottile sulla superficie. Il materiale prende il nome di vernice magra o a "spirito"; altrimenti la resina era preparata mediante riscaldamento prolungato in oli siccativi. Il processo di essiccamento è in questo caso più complesso chimicamente, comprendendo la formazione di linossina, cioè il prodotto della polimerizzazione/essiccamento degli olii siccativi. Il prodotto così preparato prende il nome di vernice grassa.

Le vernici non hanno in genere pigmenti o cariche aggiunte, al contrario degli strati pittorici descritti più sopra. La loro lucentezza superficiale dipende dalla composizione chimica, dal metodo di applicazione, dal tipo di assestamento del film e possono quindi risultare da lucide a semilucide a opache. Le vernici moderne impiegano spesso prodotti sintetici od artificiali come resine alchidiche o nitrocellulosiche per produrre un film protettivo. I prodotti alchidici sono costituiti da olii vegetali modificati e possono operare in ampio campo di condizioni; esse possono essere modificate in modo da accelerare l'indurimento. Se la vernice contiene degli additivi che preferenzialmente assorbono la componente ultravioletta della radiazione, esse conservano per un tempo più lungo le proprie caratteristiche superficiali di lucentezza ed il proprio colore.

Il degrado dei manufatti pittorici dipende in larga misura dal tipo di legante che è stato utilizzato nella tecnica. Ad esempio la sensibilità al biodeterioramento varia sensibilmente passando dalle gomme naturali, polisaccaridi, alle tempere proteiche ad altri leganti organici. Molto di frequente la crescita biologica si presenta in forma di opacizzazione grigiastra.

5. Ceramiche e vetri

Le collezioni di manufatti ceramici sono molto diffuse in ogni paese. Non esiste quasi cultura, in qualunque epoca storica, che non abbia prodotto ceramiche. La storia di questi prodotti è databile a diversi millenni prima di Cristo (probabilmente fin dal 8.000-10.000, anche se le testimonianze certe sono più recenti) e continua tutt'oggi, con produzioni industriali, artigianali ed artistiche. Si tratta di un materiale estremamente versatile: gli utilizzi più importanti si sono avuti nella produzione di vasellame, di accessori di arredi, per elementi architettonici e nelle tecniche di scultura. Il materiale ceramico è estremamente durabile. Resiste molto bene agli agenti chimici sia acidi che basici; è insensibile al fotodeterioramento ed ha come principale causa di degrado la rottura per cause accidentali o per pressione di carico nel caso di manufatti sepolti. Questo ha fatto sì che rimanessero moltissimi manufatti ceramici come testimonianze archeologiche. Le civiltà che, più di altre, hanno raggiunto livelli di eccellenza nelle produzioni ceramiche riconducono alle produzioni greche e magno-greche, etrusche con il **buccherò**, precolombiane, cinesi e islamiche. Nel rinascimento la città di Faenza diede un contributo straordinario a questo tipo di produzioni, tanto che in diverse lingue europee Faenza è

divenuto sinonimo di ceramica. Le materie prime per la produzione di una ceramica comprendono sempre un impasto a base di argille. Le **argille** possono essere mescolate tra di loro oppure ad altri minerali come dolomite, quarzo, feldspati etc. fino all'ottenimento delle caratteristiche desiderate nel prodotto finale. Le argille secondarie, essendo ricche di composti del ferro, produrranno dopo cottura un corpo ceramico colorato. Se l'ambiente di cottura è ricco di ossigeno (ambiente ossidante) il corpo della ceramica ottenuta sarà rosso o aranciato. Se l'ambiente di cottura è povero di ossigeno (ambiente riducente) il corpo ceramico dopo cottura sarà di colore molto scuro fino al nero. L'ottenimento di un ambiente riducente può essere raggiunto aggiungendo nell'impasto crudo sostanze organiche, che in cottura bruciano consumando l'ossigeno presente. Se invece l'argilla è primaria, come il caolino, essa possiede un basso tenore di composti del ferro. Il prodotto finale della cottura sarà bianco latte. In funzione della temperatura di cottura (variabile in genere tra 850°C e 1350°C) e della composizione dell'impasto e il corpo ceramico che si ottiene può essere poroso o compatto. Producendo un manufatto ceramico si ottiene una microstruttura che è almeno parzialmente cristallina. Una classificazione dei prodotti ceramici può partire da alcune caratteristiche del corpo ceramico che può essere bianco o colorato, compatto o poroso. Per materiali compatti si intendono corpi che abbiano una porosità (tra aperta e chiusa) inferiore al 5%. Un ulteriore carattere per la distinzione e la classificazione tecnica riguarda la presenza di un rivestimento che può essere vetroso o argilloso. Entrambe queste tipologie di rivestimento sono prodotte in cottura. Tra le tipologie dei rivestimenti argillosi citiamo gli ingobbi; tra quelli vetrosi gli smalti, le vetrine e le coperte per porcellane. Esiste poi la possibilità di applicare rivestimenti a freddo e si può quindi dipingere un busto di terracotta con una tecnica pittorica a tempera. Per fare qualche esempio la **porcellana** è un prodotto ceramico a corpo bianco e compatto e può avere o meno un rivestimento. Una **maiolica** è un prodotto ceramico poroso a corpo rosso ed ha un rivestimento di smalto vetroso, il quale può avere molte colorazioni. Per i materiali ceramici conservati nelle vetrine museali un fattore di degrado si può individuare nella polvere. Da questo punto di vista le superfici bianche e scabre (come ad esempio il biscuit di porcellana) sono quelle dove i depositi di particolato atmosferico risultano maggiormente visibili.

Fig. 3. Veduta della Sala 30 del Castello Sforzesco di Milano con vetrine contenenti la raccolta di ceramiche

I **vetri**, al contrario delle ceramiche, sono masse amorfe di materiali prodotti a partire da materie prime selezionate come sabbia quarzosa e un fondente (come può essere la soda). Anche per il vetro si può delineare una storia millenaria che partì dalle coste orientali del mediterraneo e vide numerosi luoghi della Siria e della Fenicia tra i primi produttori e commercianti. Non si può poi dimenticare il ruolo che ha avuto la città di Venezia dai secoli dell'alto medioevo in poi. In Inghilterra e in Boemia si affinarono le addizioni speciali di composti di piombo che portarono alla produzione del vetro cristallo. Le colorazioni dell'impasto vitreo si sono arricchite nel corso dei secoli grazie ai raggiungimenti della chimica applicata, che ha individuato una gamma di pigmenti resistenti alle alte temperature sempre più ampia. Molte sono le varianti nelle tecniche di

lavorazione che portano a manufatti che prendono il nome di vetro soffiato, ghiacciato, reticolato, a murrina, lattimo, etc. A parte le questioni relative alla sua fragilità, il vetro non ha molti fattori di degrado; resiste straordinariamente agli agenti chimici ed è insensibile alla luce. Se uno strato sottile di vetro è interfacciato ad un substrato di diversa composizione e dilatazione termica, un possibile fattore di degrado si individua nelle escursioni termiche; a questo, oltre che ad urti accidentali sono dovute le lacune negli strati vetrosi su manufatti smaltati. Ancora oggi sono molto importanti le produzioni artigianali ed artistiche. Collezioni specialistiche si trovano nel museo vetrario dell'Isola di Murano e nel Corning Museum of Glass negli Stati Uniti.

Fig. 4. Una vetrata dipinta tedesca del XVII secolo nella Sala 14 del Castello Sforzesco di Milano.

6. Materiali cartacei

I manufatti su carta che includono stampe, disegni, pastelli, materiali fotografici, ma anche rivestimenti sui supporti più vari, sono tra i materiali più vulnerabili conservati nei musei. I papiri da questo punto di vista sono strettamente connessi.

La **carta** è un materiale celluloso, costituito da materie prime vegetali, unite per infeltrimento delle fibre, cioè per la loro compenetrazione a livello microscopico e successivo essiccamento.

La cellulosa è una sostanza polimerica naturale costituita da unità di glucosio; lungo la catena sono quindi presenti numerosissimi gruppi –OH (in genere tre gruppi ossidrilici per ogni anello glucosidico); è la sostanza organica più pura che si trovi in natura nel fiocco del cotone (oltre il 90%). La presenza dei gruppi ossidrilici rende il materiale idrofilo.

Nel produrre carta vengono anche usati altri materiali organici che fungono da collanti, cariche minerali (caolino, allume, barite, carbonato di calcio, biossido di titanio), pigmenti, e diversi altri additivi.

La coltivazione del baco da seta suggerì alle popolazioni cinesi di utilizzare la materia prima dei bozzoli come fibra per ottenere dei fogli; il materiale in fibra venne successivamente (dal II secolo d.C.) ricavato dalla corteccia dell'albero di gelso, dagli steli di bambù, e dalle fibre di ramiè (*Boehmeria nivea*). L'uso della carta si diffuse quindi come materiale scrittoria a partire dall'VIII secolo tramite gli Arabi in Asia Minore e in seguito in Africa e Spagna; la città di Fabriano nelle Marche ha avuto un ruolo unico nella civiltà europea per la qualità delle carte che vi si producevano e per l'invenzione della filigrana.

L'impiego di gelatina animale evitava che l'inchiostro spandesse sulla carta e quindi consentiva la scrittura.

I cascami dell'industria tessile e gli stracci di fibra cellulosa continuarono ad essere la materia prima più utilizzata. La preparazione della polpa fu resa più veloce ed economicamente conveniente, con l'introduzione della cosiddetta "macchina olandese", dotata di utensili metallici, che riduceva gli stracci in una poltiglia. Grazie al chimico svedese Scheele, si utilizzò per la prima volta all'inizio degli anni '70 del XVIII secolo,

un processo di sbiancamento che prevedeva l'uso di cloro. Purtroppo l'uso di sbiancanti chimici compromette l'integrità della fibra sulla lunga durata e questo è stato il primo passo per l'ottenimento di carta di qualità inferiore rispetto a quelle più antiche. Infatti l'assunzione di allume e colofonia come sistema di collatura più economico rispetto alla gelatina animale, determinò un incremento dell'acidità della carta. I primi produttori di carta che usavano l'allume pensando di risolvere alcuni problemi tecnologici della fabbricazione stessa, non immaginavano che la sua presenza si sarebbe trasformata in un fattore di degrado. Infatti le fibre di cellulosa possono essere idrolizzate dalle funzioni acide dell'allume, con una perdita delle caratteristiche meccaniche delle fibre stesse.

Intervennero poi trattamenti con soda e potassa a caldo, all'interno delle cui soluzioni si sciolgono sia la emicellulosa che la lignina, mentre la cellulosa rimane indisciolta.

Nel caso di paste chimiche a causa dell'elevato residuo in lignina, il prodotto finale esibisce scarsa stabilità alla luce, con conseguente tendenza al facile ingiallimento.

La carta prodotta con il metodo Kraft (processo al solfato) al contrario non contiene grandi quantità di lignina, ed è quindi più adatta alla stampa di libri, documenti od altri manufatti per i quali si ritiene essenziale che la carta rimanga bianca nel tempo.

Le sostanze chimiche aggiunte modernamente sono di solito sostanze polimeriche che conferiscono una lucentezza superficiale ed una compattezza al materiale, in modo che si scriva al meglio. A questo scopo sono utilizzati sia polimeri naturali come gli amidi, sia polimeri sintetici come il polivinilacetato (PVA). Si possono così ottenere i tanti e diversi tipi di carta oggi prodotti.

Lo spessore della carta può essere stimato con il calibro ed è fornito in micron. Generalmente si tratta di spessori che oscillano nell'intervallo tra 70 e 180 micron. La densità della carta va da 250 kg/m^3 per la carta velina, a $1,500 \text{ kg/m}^3$ per carte speciali. La normale carta da stampa ha una densità di circa 800 kg/m^3 .

Con l'invenzione della stampa si diede uno straordinario impulso a queste produzioni: la necessità di incrementare la produzione ha purtroppo fatto sì che, quello che in origine era un prodotto di qualità eccellente, quando veniva preparato con cellulosa proveniente da fibre lunghe, ricavate da cascami di tessuti, cordami prevalentemente di canapa e di lino, venduti agli straccivendoli e collato con gelatina animale di tipo proteico, in seguito modificò in peggio gradualmente le proprie caratteristiche. Ciò avvenne anche e soprattutto con l'avvento delle paste di legno che sostituirono parzialmente le paste prodotte dalle fibre tessili. La presenza della lignina o di suoi residui rende infatti la carta molto sensibile all'azione della radiazione luminosa (in particolare della componente ultravioletta che si trova sia nella luce solare che nei bulbi fluorescenti); infatti in presenza di luce ed ossigeno la lignina reagisce producendo dei cromofori gialli; questo è il motivo per il quale le carte da giornale ingialliscono e divengono fragili con l'invecchiamento. Dal punto di vista conservativo è quindi comune che si abbiano meno problemi con un volume del '500, piuttosto che con una edizione economica del dopoguerra.

Oltre ai problemi dovuti ai metodi di fabbricazione, è necessario ricordare che la carta è comunque un materiale di scarse proprietà meccaniche per cui è soggetta a strappi, piegature, usura e danni fisici. Anche l'innalzamento di temperatura, dovuto alla presenza di lampade a filamento di tungsteno, provoca depolimerizzazione della cellulosa ed

infragilimento. Il deposito di polvere favorisce la crescita microbiologica, ma anche l'attacco di insetti. L'interazione con sostanze che vengono dai materiali usati per la scrittura (inchiostri a base di acidi gallici, sostanze che contengono metalli come ferro o rame) possono dare luogo a fenomeni localizzati di attacco chimico al supporto cartaceo o alla formazione di macchie rossastre che prendono il nome di foxing. Inoltre recenti studi condotti dalla Library of Congress di Washington, provano che tutta la carta è a rischio di degrado acido, dal momento che un certo pattern di decomposizione della cellulosa stessa può produrre acido formico, acetico, lattico ed ossalico.

Attualmente si produce meno carta, rispetto ad un passato recente, e quindi la produzione punta sulla qualità e sulla durabilità. Si producono quindi carte adatte ad una lunga conservazione all'interno di archivi e biblioteche, oppure finalizzate alla stesura di documenti di importante valore, da utilizzare insieme ad inchiostri chimicamente poco aggressivi.

7. Cuoi e pergamena

La concia del **cuoio** è senza dubbio una delle attività più antiche dell'umanità. I primi tentativi di concia furono probabilmente eseguiti mediante l'ausilio di grassi animali e dell'affumicatura. Nei vapori prodotti bruciando foglie verdi e rami si trovano aldeidi a basso peso molecolare come la formaldeide, sostanze responsabili dell'inibizione dei processi di putrefazione. In seguito i metodi furono perfezionati con l'uso di sali e con la concia vegetale. Tutte le popolazioni antiche usarono quindi cuoi e pelli per le calzature, per abiti, per parti di armi.

Negli eserciti greco e romano si usavano cuoi spessi e duri, prodotti con una concia vegetale, per produrre strutture per la difesa come corazze e scudi. Furono poi gli arabi ad utilizzare varie tecniche di decorazione, come l'impressione operata sul materiale umido, la doratura, la pittura. I cuoi di Cordova sono celebri e sono stati usati come rivestimento parietale, nell'arte della legatoria, come fodere per arredi. In Italia si ottennero in seguito cuoi bulinati, cesellati e stampigliati. La possibilità di modellare forme complesse ha reso questo materiale molto utile nella produzione di astucci per strumenti scientifici o musicali.

La **pergamena** prende il nome dalla città di Pergamo in Asia Minore, dove nel II secolo a.C. fu messa a punto la procedura della sua preparazione per ovviare alla scarsità di approvvigionamenti di papiro dall'Egitto. La pezzatura ed il peso dei singoli tagli di pergamena imposero il passaggio dalla forma del rotolo (in uso con il papiro) alla forma del libro. L'uso della pergamena ebbe quindi il massimo fulgore fino a che fu progressivamente importata la carta da parte degli arabi e fino alle prime produzioni europee nel XII secolo. Dopo di ciò la pergamena fu relegata solo a supporto di particolari ed importanti documenti.

Si tratta quindi, sia per i cuoi che per la pergamena, di materiali costosi, destinati quindi a produzioni di un certo lusso e ad uso di classi sociali abbienti.

La pelle è un tessuto costituito da un intreccio tridimensionale di fibre di collagene. Il termine collagene indica una famiglia di proteine che possiedono una microstruttura a fibrille; in breve tempo dopo la morte dell'animale intervengono processi di putrefazione;

i processi che inibiscono la putrefazione, conferendo durata e proprietà meccaniche alla pelle prendono il nome di concia. La concia ai tannini (composti polifenolici in grado di formare complessi insolubili con le proteine della pelle) venne probabilmente scoperta esponendo le pelli a soluzioni ottenute da vegetali. I tannini possono essere estratti da foglie e da altri materiali vegetali. Una pelle tenuta a lungo in contatto con una soluzione di tannini acquisisce una colorazione bruna. In funzione del tipo di sostanza conciante, le pelli acquisiscono proprietà meccaniche differenti e venivano quindi destinate a produzioni diverse; per manufatti di lusso era particolarmente adatta la concia all'allume (sali doppi di alluminio e ferro).

Se la pelle veniva posta in contatto con una soluzione di calce la rimozione del pelo era di gran lunga facilitata.

A partire dal XVIII secolo, vengono utilizzati procedimenti a base enzimatica al fine della rimozione del pelo. Per le pelli veniva poi predisposto un telaio per il tensionamento, che facilitava l'allineamento parallelo delle fibre.

I trattamenti subiti dai cuoi per finire e conservare nel tempo i manufatti dipendono fortemente dal metodo di concia che hanno subito. Ad esempio i cuoi conciati mediante tannino, possono essere trattati con oli e questo migliora le caratteristiche di resistenza nei confronti dell'acqua. Ad ogni modo nel tempo si produce una depolimerizzazione e le fibre che costituiscono il cuoio vanno incontro ad una frammentazione e ad un infragilimento. Il materiale vede modificarsi le proprie proprietà meccaniche e spesso polverizza, virando il proprio colore verso il rosso. Questo tipo di danni si verificano con maggiore intensità e velocità se i cuoi sono conservati in ambiente con elevate temperature ed umidità ambientale. L'umidità ambientale è quindi un fattore critico per questi problemi conservativi dal momento che al di sotto di un certo valore, stimabile in circa il 40%, si può produrre una eccessiva secchezza. In queste condizioni il cuoio modifica la propria microstruttura fibrosa e si deforma. Numerosi sono i fattori ambientali che intervengono nella conservazione dei cuoi: la radiazione UV, la presenza di ozono o di altri ossidanti forti, la presenza di acidi che possono generarsi anche da trattamenti che il cuoio ha subito a base di grasso animale o di oli.

Al contrario dei cuoi, la pergamena non viene conciata; è ricavata in genere dalla pelle di animali giovani. In corrispondenza del bacino del Mediterraneo era diffuso l'uso di pelli di capretti e agnelli e, per questo motivo, veniva anche chiamata cartapeccora; nel nord Europa e soprattutto in Inghilterra prevaleva invece l'uso di vitelli. Esistono quindi diverse qualità di pergamene che, pur presentandosi di diverso spessore, consistenza superficiale e colore, presentano in genere buone proprietà meccaniche e di elasticità. Le varietà venivano quindi scelte in base alla lavorazione che avrebbero subito. Nelle arti di legatoria si usavano pergamene più spesse e di colore scuro, mentre come supporto scrittoriale venivano usate varietà sottili e di colore chiaro.

Il fatto che la pergamena non sia conciata la rende maggiormente suscettibile alle variazioni termo-igrometriche ed in particolare all'umidità che può provocare deformazioni. Se i fogli di pergamena sono costretti da una struttura di legatoria, a volte costituita da materiali molto solidi come legno o metallo, la pergamena viene mantenuta in pressione e si deforma poco. Se al contrario un libro è aperto, come spesso accade

nell'esposizione in vetrina, queste condizioni di vincolo meccanico vengono a diminuire e il pericolo di deformazioni aumenta.

Il riconoscimento dell'animale di origine, sia per le pergamene che per il cuoio, può essere effettuato tramite una osservazione microscopica di alcuni caratteri microstrutturali come la disposizione dei follicoli sulla superficie dal lato che originariamente ospitava il pelo.

Quando viene usata come supporto per strati pittorici a base acquosa, il materiale pergameneo si ammorbidisce se entra in contatto il medium pittorico, formando un substrato leggermente rilevato sul quale si assesta lo strato di colore. Questo costituisce un effetto di pregio per molti artisti. Per questo motivo la pergamena è stata usata anche come supporto per opere dipinte a pastello da grandi artisti come il pittore ginevrino Jean Étienne Liotard.

8. Materiali tessili.

Nelle collezioni museali esistono numerosi manufatti tessili sia in forma di frammenti, di solito di provenienza archeologica, sia in forma di manufatti integri nelle collezioni di costumi, nei musei storici oppure nelle collezioni etnografiche. Nelle produzioni antiche fino all'inizio del XX secolo, le fibre sono classificabili in due classi: fibre di tipo proteico (lana e seta) e fibre di tipo celluloso (lino, cotone, juta, canapa, ramiè). Per ragioni eminentemente storiche nelle collezioni museali sono soprattutto i manufatti in **seta** ad essere conservati; questi infatti costituiscono esemplari di pregio che venivano indossati solo in occasioni speciali e venivano tramandati di generazione in generazione e per questo motivo si sono conservati in maggior numero. Al contrario manufatti tessili in fibra naturale di altro tipo veniva indossata fino a consunzione. Fanno eccezione i numerosi manufatti in **lino** conservati nelle collezioni egizie di tutto il mondo. In manufatti di provenienza archeologica molto spesso lana e lino sono usati insieme, così come accade negli arazzi. Le fibre tessili sono state utilizzate sia in costumi, che in arazzi, stendardi, bandiere, tappezzerie storiche, pizzi, merletti, ricami. Per tutti questi manufatti, tranne che per arazzi e tappezzerie, si prevede normalmente una conservazione all'interno di vetrine. Esiste anche il caso che alcuni dei fili che costituiscono il tessile sia rivestito da una foglia d'oro o di argento attorcigliata attorno ad un filo che fa da supporto.

L'epoca della manifattura delle fibre sintetiche iniziò in Francia con il **rayon** nel 1890. Il rayon è un derivato della cellulosa naturale che richiede un metodo di lavorazione piuttosto complesso. Ciò condusse ad un suo scarso successo commerciale. Il periodo delle fibre sintetiche era appena iniziato ed una lunga serie di prodotti avrebbero fatto la loro comparsa nei decenni successivi. Le fibre a base di acetato furono sviluppate a partire dal 1924. Il **nylon** fu la prima fibra sintetica preparata partendo da prodotti petroliferi e fu un grande successo industriale dell'americana Du Pont nel 1936, seguita pochi anni dopo e dalla stessa azienda, dalle prime fibre acriliche. Con l'avvento delle fibre poliestere nei primi anni '50, il mondo delle fibre sintetiche causò una crisi all'industria delle fibre naturali, in particolare a quella del cotone.

Le fibre tessili sono prodotti che, per la loro struttura, lunghezza, resistenza ed elasticità, mostrano grande resistenza a trazione e flessibilità. Attraverso le operazioni di filatura, che uniscono le fibre per torsione, vengono utilizzate per produrre i filati. Questi ultimi a loro volta, attraverso macchinari od operazioni di intreccio, vanno a costituire i tessuti.

Le fibre sono caratterizzate, oltre che dalla natura compositiva, dalla morfologia che molto spesso viene utilizzata per il loro riconoscimento mediante sistemi di microscopia. E' spesso la morfologia che determina l'uso del filato. La geometria della fibra viene definita essenzialmente mediante la misura della lunghezza e del diametro medio. Il cosiddetto titolo definisce il peso per unità di lunghezza di una determinata fibra. Dalla conformazione della superficie della fibra dipendono le proprietà di riflessione della radiazione luminosa e quindi la lucentezza della fibra. Si definisce lucentezza serica quella propria della seta. Per la loro conservazione è molto importante la composizione chimica e la conseguente stabilità rispetto ad agenti acidi, basici o alla luce. I materiali cellulosici sono per loro natura idrofili e si ricavano dal fiocco delle piante del genere *Gossypium*, dove hanno una funzione di rivestimento dei semi. L'uso del **cotone** come materiale tessile è documentato fino dai tempi preistorici. Frammenti di materiali tessili in cotone sono stati ritrovati in scavi nella Valle dell'Indo. La lunghezza delle singole fibre varia da 1 a 6 cm e il diametro medio varia tra 12 e 20 micron.

La presenza di soluzioni acide indebolisce le fibre che sono normalmente resistenti anche ai comuni solventi organici. Al contrario una prolungata esposizione alla luce indebolisce la cellulosa attraverso una depolimerizzazione indotta soprattutto dalla componente UV. Questo materiale mostra anche una certa sensibilità ad alcune specie di insetti (pesciolino d'argento -*Lepisma saccharina*), ma nelle opportune condizioni termo-igrometriche il materiale è anche soggetto alla crescita di muffe.

Il lino è una fibra composita ricavata dal libro del *Linum usitatissimum*, composta per circa il 70% da cellulosa. Tessuti di lino sono apparsi con le prime civiltà. Le mummie egiziane sono quasi sempre avvolte in tessuti di lino e spesso, a distanza di migliaia di anni dalla loro manifattura, sono ancora in ottime condizioni di conservazione. Esso possiede fibre molto lunghe se confrontate alla lunghezza delle fibre del cotone e di altre fibre naturali. La fibra di lino raggiunge lunghezze fino a diverse decine di mm ed un diametro medio attorno ai 15 micron. Ha buone proprietà di resistenza alla trazione, ma non è molto elastica. Per queste ragioni il lino è più difficile da lavorare e quindi più costoso. Nelle sue proprietà meccaniche risiedono le ragioni per le quali gli artisti hanno scelto il lino quale tessuto preferito per le tele destinate ad essere supporti per dipinti. Il lino è anche meno sensibile del cotone alle variazioni igrometriche e si restringe meno. Anche questa è un'ottima ragione per preferirlo al cotone come supporto per dipinti. Il lino è quindi una fibra molto durevole, resistendo bene anche a danni da abrasione. La tela di cotone come supporto per le arti pittoriche ha trovato una breve preferenza tra gli artisti americani del XX secolo.

La seta è una fibra proteica naturale principalmente costituita dalla proteina fibroina. Si ottiene dai bozzoli del *Bombyx Mori*. La fibra della seta è in grado di riflettere la luce incidente in modo da dare effetti di lucentezza tipica, grazie alla sua sezione triangolare. Diversi tipi di seta furono prodotti in Cina fin dai tempi antichi attraverso la raccolta di bachi selvatici. Fu però soltanto con le tecniche di sericoltura che si ottennero tipi di seta

uniformi per colore e tessitura. Si presume che i primi manufatti in seta risalgano alla metà del IV millennio a.C. Da sempre la seta è stata oggetto di commercio attraverso l'India e il medio oriente, al punto che un insieme di rotte commerciali tra Europa ed Asia prendono il nome di Via della Seta. L'Italia è stata il maggior produttore europeo dai secoli del medio evo, con la produzione concentrata a Venezia, a Lucca, a Firenze e soprattutto a Como. Nella fibra grezza la proteina sericina agisce come un adesivo che tiene unita la fibroina. E' una delle fibre naturali più lunghe ma perde una parte della sua lunghezza quando viene inumidita. Resiste bene agli acidi minerali tranne che all'acido solforico. Ingiallisce facilmente a causa della traspirazione umana. Molti dei tessuti utilizzati dalle manifatture di lusso usano la seta come la materia prima, come chiffon, taffetà, shantung. Si trova quindi in molti musei della moda e del costume sia in abiti che in accessori; esistono anche numerosi ritrovamenti di frammenti di manufatti in seta utilizzati in sepolture di alti dignitari e di sovrani.

Anche la lana è una fibra proteica che si ricava dal taglio del vello di pecore, capre, ma anche da cammelli e lama. La fibra ha sezione circolare ed una struttura superficiale a scaglie. Il suo colore è banco avorio. La proteina che la costituisce è la cheratina. La sua particolare struttura che presenta ondulazioni regolari, rendono conto della sue proprietà. Il suo difetto principale risiede nell'infeltrimento. Per questa ragione non sono molti i manufatti in lana antichi che si sono conservati fino a giorni nostri. Fanno eccezione gli arazzi. In numerose collezioni etnografiche che raccolgono manufatti di popolazioni dell'Asia Centrale, vi sono tappeti e manufatti di feltro di lana.

Di grande interesse conservativo è la trattazione dei coloranti, naturali e sintetici, che danno il colore al manufatto tessile: dalla mitica porpora di Tiro, al giallo gambogia, dall'indaco, ai derivati alizarinici, fino ai numerosissimi prodotti di sintesi azoici, antrachinonici e alle ftalocianine. Per mancanza di spazio qui possiamo solo dire che tutte queste sostanze non hanno una grande resistenza alla luce e quindi i manufatti scoloriscono facilmente. Questo è il motivo per cui spesso essi sono conservati in depositi al buio ed esposti solo in mostre temporanee, oppure per i manufatti di minore dimensione, si organizzano cassette a scorrimento in cui i manufatti sono sempre protetti dalla luce.

9. Materiali plastici

Le materie plastiche sono sostanze polimeriche spesso miscelate con additivi organici che conferiscono al prodotto finale determinate proprietà, e con cariche di tipo inorganico. I polimeri derivano da unità strutturali ripetute lungo la catena sino ad arrivare a molecole di peso molecolare molto elevato. Per questa ragione essi vengono considerate macromolecole. Il numero di unità strutturali che si ripete definisce il cosiddetto grado di polimerizzazione e contribuisce a determinare le proprietà finali del polimero. I polimeri solidi hanno peso molecolare molto vario che può essere compreso in un intervallo da 10000 a diversi milioni di g/mole. La catena polimerica può essere lineare, ramificata, o a rete tridimensionale. Se le unità strutturali costituenti sono tutte uguali tra di loro si parla di omopolimeri; se sono differenti tra di loro siamo in presenza di un co-polimero.

Si ricorda che esistono molti polimeri naturali come le proteine, la cellulosa, il caucciù etc.

L'industria dei materiali polimerici utilizza il petrolio come fonte di materie prime; è possibile produrre materie plastiche partendo anche da altre risorse.

Le materie plastiche ed i polimeri prendono spesso il nome dalle unità strutturali, ad esempio i materiali acrilici derivano dall'acido acrilico, i vinilici dal cloruro di vinile o da altri derivati vinilici (alcol vinilico o acetato di vinile), etc. Una possibile classificazione dei materiali polimerici prende in considerazione il loro comportamento rispetto al calore. Da questo punto di vista si classificano in termoplastici e in termoindurenti. I primi rammoliscono se esposti ad una fonte di calore. Possono quindi essere modellati in stampi a caldo. Dopo raffreddamento tornano ad avere le proprietà meccaniche iniziali. I materiali termoindurenti tendono invece ad irrigidire e dopo una certa temperatura, bruciano. I materiali elastomerici possiedono una elevata deformabilità. La temperatura oltre la quale i polimeri passano da uno stato rigido ad una condizione di rammollimento prende il nome di temperatura di transizione vetrosa (T_g) ed è una delle principali caratteristiche di questa classe di materiali.

Nella produzione viene messa a punto una miscela che impiega spesso sostanze inorganiche come additivi. Secondo una definizione commerciale è possibile classificare anche i materiali polimerici in fibre, caratterizzate da elevata resistenza meccanica a trazione, in resine prodotte a partire da polimeri termoindurenti, ed in materie plastiche che utilizzano invece sia polimeri termoplastici che termoindurenti ed infine in gomme che utilizzano materiali elastomerici.

Tra le prime materie plastiche a fare la loro apparizione si ricordano l'**ebanite**, le resine fenolo-formaldeide, dette anche **bakelite**, la **celluloide**, la **galalite** (che utilizzava la caseina del latte come materia prima), a soddisfare le esigenze di molte industrie emergenti nel primo novecento. Molti di questi primi oggetti sono ora musealizzati in collezioni di carattere storico e documentano queste prime produzioni. Molti sono gli artisti che hanno usato materiali polimerici nella produzione delle loro opere da Naum Gabo che ha utilizzato plexiglas e nylon, Henry Moore che ha realizzato sculture in poliestere rinforzato, Vantongerloo e Bruno Munari che hanno sfruttato le trasparenze dei materiali acrilici, Arman che ha inglobato in polistirene oggetti della vita di tutti i giorni. Ricordiamo a solo titolo di esempio i musei del giocattolo, le collezioni di design ed i molti archivi aziendali come quello dell'italiana Kartell, in rete nel grande Museo della Triennale di Milano.

Sostanze acriliche sono anche stati usati come leganti pittorici. Essi hanno un indice di rifrazione estremamente basso il che assicura una elevata trasparenza. Se vengono formulati con sostanze che conferiscono resistenza alla radiazione UV, esse non mostrano eccessive **decolorazioni** se esposti alla luce. Gli effetti degli assorbitori UV perdono progressivamente efficacia dopo qualche anno ed i materiali divengono così progressivamente sensibili all'irraggiamento.

10. Cere

Dal punto di vista chimico, le **cere** sono miscele di esteri, alcoli, acidi saturi con catena da 14 a 30 atomi di carbonio. Le cere naturali sono molte anche se spesso solitamente si fa riferimento alla sostanza prodotta dalle api e utilizzata come materiale costitutivo delle celle dei favi. Oltre alla cera d'api anche la cera carnauba è molto utilizzata, nel campo della conservazione dei beni culturali; si tratta di una cera vegetale che viene spesso usata in miscela con la cera d'api per migliorarne le proprietà meccaniche. Esistono poi cere minerali (cere montane) e cere sintetiche che chimicamente sono classificabili come paraffine. La cera d'api ha un punto di rammollimento molto basso attorno ai 55-56 °C mentre la cera carnauba può superare i 100°C. Le cere sono state usate per le loro straordinarie proprietà di lavorabilità, in tecniche di modellazione e come materiali per prototipi e modelli.

Le cere sono state usate per la loro insolubilità in acqua e per la loro idrofobia. Sono quindi materiali particolarmente adatti per proteggere dall'acqua e dall'umidità varie superfici. E' quindi molto frequente che superfici di molti materiali artistici come manufatti lignei o bronzei siano trattati con una cera come finitura.

Esistono poi rare ma bellissime collezioni di manufatti in cera dove la il materiale è stato usato a causa della straordinaria abilità di imitare i tessuti umani. Collezioni di cere anatomiche sono conservate nelle Museo della Specola a Firenze e in alcuni musei universitari in Italia e all'estero. Il materiale cera viene colorato in pasta ed è utile per imitare molti altri materiali. Nei musei universitari di Firenze è conservata una collezione di modelli di piante realizzate in cera.

11. Avorio e osso, ambra, tartaruga e lacche.

In molte collezioni museali o nei tesori musealizzati di importanti luoghi di culto sono conservati oggetti preziosi che nascono dall'assemblaggio di materiali rari. Possono costituire copertine di evangeliari, cofanetti, calici od altri oggetti liturgici. Sono spesso ciò che resta di più importanti collezioni che appartenevano al tesoro di importanti cattedrali o di famiglie che li hanno raccolti nel corso dei secoli. Tipicamente questi oggetti sono polimerici e risultano dall'assemblaggio di metalli nobili, di pietre dure e preziose, di avorio, osso, ambra, corallo. Il materiale di supporto può essere legno, con rivestimenti di lastre di tartaruga, malachite, lapislazzuli, oppure finiture di lacche orientali. Di alcuni dei materiali qui sopra elencati si è trattato nei paragrafi precedenti; qui di seguito vengono illustrati brevemente i rimanenti.

Il materiale osseo di cui si compone lo scheletro si compone di diverse componenti ed è da considerarsi distinto dal materiale dentale; analogamente il materiale cheratinoso di cui si compone il **corneo** ha poco a che fare con **osso** e **avorio**, se non la comune origine organica di tessuti animali considerabili come duri. Il tessuto osseo consiste di una frazione organica e di una inorganica intimamente combinate. La matrice organica rende conto di una parte consistente del tessuto (variabile tra il 25 e il 60% del totale in peso): essa consiste in massima parte della proteina fibrosa collagene insieme ad altri materiali proteici e polisaccaridici. Il collagene ha una struttura in fibrille intimamente connesse le une alle altre e frequentemente intrecciate a formare una intelaiatura che costituisce la struttura ossea. Nel processo di ossificazione cristalli di idrossiapatite (un complesso tra

fosfato di calcio e idrossido di calcio) incrostanto le fibre di collagene. Un certo quantitativo di apatite amorfa è anche contenuta nella frazione inorganica. Nel tessuto dentale la presenza dello smalto e della dentina comporta cellule di differente morfologia rispetto a quelle presenti nel tessuto osseo. I cristalli di apatite crescono in dimensione e si impaccano più strettamente dando luogo ad un tessuto con proporzioni di materia organica non particolarmente rilevanti. Le qualità materiche dell'avorio hanno fatto sì che esso sia stato largamente usato dalla preistoria fino a tempi recenti per la produzione di oggetti di pregio realizzati con diverse tecniche che vanno dalla scultura a tutto tondo, all'incisione a basso rilievo, al graffito ma anche in combinazione con policromie.

Come materiali per le tecniche artistiche hanno particolare importanza i denti di elefante e di tricheco; i denti di cinghiale e di ippopotamo sono impropriamente considerati come avorio. Esiste poi l'avorio dei Mammut, vissuti nelle steppe russe dal Pliocene fino a circa 3500 anni fa, noto anche con il nome di avorio fossile. L'avorio fossile, in genere ben più scuro, si distingue composizionalmente dall'avorio comune a causa della presenza di una sostanza come la vivianite, ben evidenziabile mediante illuminazione UV. Utilizzato da molte civiltà antiche, sono pervenuti a noi manufatti fenici (celebri i cosiddetti Avori di Nimrud), egizi, greci, etruschi e romani. Molto usato anche nella scultura gotica francese per statuette a tutto tondo, pettini, valve di specchi, astucci. Nel tardo rinascimento e nell'epoca barocca è stato lavorato al tornio con esiti straordinari (Collezioni del Museo degli Argenti a Firenze e di Dresda). Nel tempo è divenuto un materiale sempre più raro, fino alle attuali leggi finalizzate alla preservazione delle specie che lo producono, che rendono il suo attuale commercio pressoché inesistente. Per questo motivo nell'ultimo secolo sono andate moltiplicandosi le tecniche di falsificazione. Il materiale di imitazione prende il nome di **avoriolina** e può essere realizzato con polveri di avorio in un legante polimerico, con materie plastiche oppure con il cosiddetto avorio vegetale, tratto da semi. Tuttavia la grana, il colore, le caratteristiche materiche e superficiali non rendono facile una falsificazione. L'avorio è costituito da apatite microcristallina (fosfato di calcio) in presenza di bassi tenori di carbonato di calcio e di proteine che esercitano la funzione di leganti. Lungo una sezione trasversale l'avorio tende a dividersi lungo linee strutturali. L'avorio è un materiale estremamente sensibile alle variazioni igrometriche. Può infatti distorcersi, deformarsi o fessurarsi lungo direzioni preferenziali. Per quanto concerne manufatti in avorio dipinto, lo strato pittorico può distaccarsi.

Fig. 5. Le vetrine della Sala 32 del castello Sforzesco di Milano che contengono una parte della collezione di avori.

Vengono definite **Lacche** dei manufatti orientali prodotti tipicamente in Cina, in Giappone ed in Corea, con una finitura che essicca per evaporazione del solvente e che indurisce formando un film molto durabile e resistente; questo tipo di finitura esiste sia in forma opaca che lucida e può essere ulteriormente polita. Nelle arti decorative il termine lacca si riferisce ad una varietà di manufatti e tecniche usate per decorare oggetti in metallo, legno o altri materiali, di solito inciso a formare superfici di complessa decorazione. I manufatti in lacca costituiti da quella speciale materia prima, detta

Urushiol, è diversa da altri manufatti in lacca, essendo a più lento essiccamento; inoltre il meccanismo di indurimento si basa su di un doppio meccanismo di evaporazione del solvente e polimerizzazione, piuttosto che sulla sola evaporazione del solvente. Questo materiale richiede un ambiente umido e caldo al fine di indurire in maniera corretta. La materia prima *Urushiol* è costituita essenzialmente da polifenoli sostituiti detti catecholi, in sospensione acquosa, con un minimo contenuto di proteine. Essi si ossidano e polimerizzano in seguito all'azione di un enzima detto laccasi; si perviene ad una superficie che, in seguito alla completa evaporazione dell'acqua che contiene, produce uno strato duro e lucido. Da sempre questi manufatti hanno incontrato grande apprezzamento estetico e sono considerati molto durevoli oltre che resistenti all'acqua, all'azione di agenti chimici, alcali e alle abrasioni. La resina è derivata da un albero originario della Cina, della specie *Toxicodendron vernicifluum*, conosciuto con il nome comune di albero della lacca. Le lacche devono essere conservate a livelli di umidità relativa piuttosto alti.

Il guscio di alcune specie di tartarughe di grandi dimensioni fornisce placche di un materiale prezioso utilizzato fin dai tempi antichi, sia in occidente che in Asia. Del carapace delle tartarughe si usa soprattutto la parte superiore e ciascuna squama prende il nome di scuto. Le grandi dimensioni, la colorazione di raffinata mazzatura, il pattern decorativo a macchie di grande riconoscibilità e la forma inusuale hanno reso il guscio delle tartarughe marine embricate particolarmente adatte a questi scopi.

La **tartaruga** è stata utilizzata nelle tecniche artistiche sin dai tempi antichi. Come esempio possono essere riportate le antiche lire greche, la cui cassa armonica era costituita da un intero guscio. Piallacci di tartaruga erano popolari tra i ricchi romani ed utilizzati come elementi decorativi nella costruzione di mobilia preziosa, come ad esempio i letti sui quali i romani erano soliti consumare la cena, o per oggetti di piccole dimensioni.

La tartaruga come materia prima, è stata usata in sottili lastrine nella manifattura di un'ampia varietà di oggetti come pettini, scatolette, cornici, inserti di mobilia e montature di occhiali. Nonostante il costo elevato la manifattura di oggetti in tartaruga è sempre stata grandemente apprezzata anche per la sua durabilità, la sua tessitura e la calda sensazione che suscita sulla pelle. Le placche del carapace vengono scaldate e ammorbidite in acqua salata e bollente, appiattendole poi sotto delle presse. Due elementi possono anche essere saldati con un ferro caldo, ma l'operazione deve essere condotta con grande cura per non rischiare di attenuare il colore. Le operazioni di finitura e di politura erano condotte con varie tecniche sia in Europa, che negli Stati Uniti.

Il commercio delle placche di tartaruga è bandito da una convenzione internazionale fin dal 1973. Il materiale è stato quindi oggetto di molte sofisticazioni e falsificazioni. A questo scopo sono stati utilizzati il corno e materie plastiche.

André Charles Boulle (1642-1732), mobiliere di Luigi XIV di Francia introdusse una tecnica di livello estremamente sofisticato, denominata *marquetry* combinando sottili lastrine di tartaruga con metalli, legni pregiati avorio e **madreperla**. Questo stile è ancora conosciuto con il nome del suo inventore, che può essere ricordato come uno dei più grandi ebanisti di tutti i tempi. Piccoli oggetti di lusso estremo come tabacchiere da fiuto

erano decorate con una tecnica definita piqué, costituita da inserti di metalli preziosi e gioielli entro la tartaruga.

Nella comunità scientifica con il nome di **ambra** si intende una resina fossile; in funzione della provenienza geografica del ritrovamento vengono identificate le diverse varietà.

Essa è di colore caratteristico che varia in una tavolozza che va dal giallo caldo all'arancio al rossiccio; non mancano varietà con sfumature bluastre o verdastre. E' altrettanto tipica la tessitura mazzata e la superficie traslucida. La trasparenza è funzione della presenza di numerose bollicine che sono visibili in microscopia. Con il termine di succinite si indica più propriamente l'ambra di provenienza baltica che è la più comune. L'ambra baltica ha rivestito una estrema importanza nella storia d'Europa e basterebbe ricordare la via dell'ambra che dalle spiagge del baltico conduceva i preziosi frammenti di resina fossile presso i porti dell'alto Adriatico ed il Mediterraneo. Si spiegano in questo modo gioielli di ambra ritrovati tra i tesori dei faraoni, oppure in molte sepolture di popoli italici. Quando gli alberi e specialmente le conifere emettono la resina, essa è molto appiccicosa e resti vegetali o animali di piccole dimensioni possono rimanere intrappolati all'interno di una massa di resina. Questa cade poi al suolo e subisce un lento processo di invecchiamento.

L'ambra baltica si raccoglie spesso sulle rive del mare, dove viene convogliata dai movimenti delle onde, ed in particolare sulle coste del mar Baltico, ma soprattutto in Russia, in Lituania ed in Lettonia.

Esiste poi una ambra caraibica che fornisce un'ambra di grande qualità dal colore verdastro o bluastro. Lo sfruttamento di questi giacimenti è però più recente e non ha interesse per la storia dei manufatti realizzati con questo materiale.

Lungo le rive del fiume Simeto in Sicilia esistevano piccoli giacimenti di un'ambra rossa molto bella che ora è esaurita. Il materiale siciliano ha avuto però una limitata importanza storica.

L'ambra si carica di elettricità se viene strofinata. A questo si deve il nome di *elektron*, datole dai greci. L'acido succinico dal forte odore penetrante, è presente nell'ambra in una percentuale che varia dal 2 all'8%.

Importanti collezioni sono conservate al Museo Archeologico di Aquileia e al Museo degli Argenti di Firenze. Avvincente è poi la storia della cosiddetta Camera d'Ambra, un ambiente di uno dei castelli di Caterina di Russia, i cui pannelli di rivestimento furono trafugati durante la seconda guerra mondiale e mai più ritrovati.

Ringraziamenti

Le immagini che corredano il presente testo ritraggono alcune vetrine contenenti oggetti delle Raccolte Artistiche del Castello Sforzesco di Milano. Le Raccolte del castello costituiscono uno straordinario esempio della ricchezza e della varietà di materiali usati nelle tecniche artistiche. Si ringraziano la Direzione delle Raccolte Artistiche del castello Sforzesco e il Comune di Milano.

Bibliografia di riferimento:

- Archeologia dei Materiali da Costruzione*. Aurora Cagnana, S:A:P: Ed. 2000
- Bone, Antler, Ivory and Horn. The technology of skeletal materials since the Roman period*. Mac Gregor, A. Routledge Library Ed. Archaeology. 1985.
- Conservation and Restoration of Glass*, Sandra Davison, Butterworths, 2003.
- Conservation of leather and related materials*, Marion Kite, Rhon Thomson, Elsevier, 2006.
- Civiltà del legno*, Catalogo della mostra. Sagep. Ed. 1985.
- Gli Avori. Problemi di restauro*. Elena Cristoferi. Nardini Ed. 1992.
- Glossario delle tecniche pittoriche e del restauro*. Claudio Paolini e Manfredi Faldi, Ist. Per l'Arte ed il Restauro Palazzo Spinelli, 1999
- Il Mobile. Conservazione e Restauro*, Cristina Ordonez, Leticia Ordonez, Maria Del Mar, Nardini Ed. 2003.
- I tessuti. Degrado e restauro*. Francesco Pertegato, Nardini ed. 1993.
- La carta e il suo degrado*. Maurizio Copedé. Nardini Ed. 1991.
- Legno e restauro. Ricerche e Restauri su architetture e manufatti lignei*. A cura di Gennaro Tampone, Messaggerie Toscane, 1989.
- Le Plâtre. L'art et la matière*. Groupe de recherche sur le plâtre dans l'art, sous la direction de G. Barthes. Creaphis, 2001.
- Le Tecniche artistiche*, a cura di Corrado Maltese, Mursia Ed. 1973.
- Organic Chemistry of Museum Objects*, John Mills & Raymond White, Butterworths, 1987.
- Painted Wood: History and Conservation*, a cura di Valerie Dorge e Carey Howlett, Getty Conservation Institute, 1998.
- Painting materials. A short encyclopedia*, Rutheford J. Gettens and George Stout, Dover Pub. 1966.
- Preparazione e finitura delle opere pittoriche*. a cura di Corrado Maltese, Mursia 1993.
- Scienza e Ingegneria dei Materiali*, William Callister, Edises, 2002
- Storia del Vetro*. Dan Klein e Ward Lloyd, Ist. Geografico De Agostini, 1984.
- Tecniche e Materiali delle Arti*, Antonella Fuga, Electa, 2004.
- Tecnologia Ceramica Illustrata*. Gastone Vecchi, Faenza Ed. 1977
- The Artist Handbook of Materials & Techniques*. Ralph Mayer. 5° Ed. Faber & Faber.
- The Conservation of Glass and Ceramics. Research Practice and Training*, a cura di Normann Tennent, James & James, 1999.

The Materials and Methods of Sculpture, Jack C. Rich, Dover Pub., 1974.

The Materials of the Artist. Max Doerner, Harvest Book, 1984.

The Materials of Sculpture. Nicholas Penny, Yale University Press, 1993.
1991.

Tecnica Mista. Materiali e procedimenti nell'arte del XX secolo. Marina Pugliese, Bruno Mondadori, 2006.

Tutti i musei d'Italia a cura di Vittorio Sgarbi. Editoriale Domus, 1984.

UNI Beni Culturali 10739. Tecnologia Ceramica. Termini e Definizioni. Milano, 1998.

Introduzione

Lo scopo principale di una vetrina/teca è quello di ridurre il rischio da danni fisici (come ad esempio, furto, atti vandalici, calamità naturali) e di migliorare il controllo dell'esposizione ai parametri ambientali (umidità relativa, temperatura dell'aria, polveri, sostanze inquinanti e radiazione luminosa).

La conoscenza delle caratteristiche dei materiali costitutivi gli oggetti destinati ad essere conservati all'interno delle vetrine/teche è fondamentale per comprendere gli effetti della loro interazione con l'ambiente e le sue variazioni. Il crescente sviluppo del turismo culturale, assistiamo ad un crescente aumento del numero di mostre e di visitatori con conseguente aumento della pressione "antropica" sugli oggetti in esposizione, impone un controllo e un'attenzione particolare alla manutenzione e prevenzione dei manufatti/opere esposte nei musei. Per questo l'esigenza della conservazione degli oggetti di interesse per il patrimonio culturale all'interno dei musei richiede l'impiego di strumenti avanzati e di competenze multi-disciplinari.

L'eterogeneità delle opere/manufatti conservati, la loro complessità intesa come numero di variabili e la loro correlazione/dipendenza con i parametri ambientali impongono degli studi preliminari alla scelta di una vetrina adatta sia all'oggetto da preservare che all'ambiente in cui la vetrina viene collocata. In alcuni casi, una vetrina mal costruita o non scelta adeguatamente può costituire per il manufatto una condizione di conservazione peggiore rispetto alla sua assenza.

Nella progettazione delle teche è importante tenere in considerazione le opinioni condivise tra tutti i membri del gruppo di esperti che organizza l'esposizione, includendo ad esempio curatori, restauratori, conservatori, scienziati, architetti, grafici, esperti di illuminazione e altri esperti capaci di contribuire a completare il quadro conservativo dell'oggetto.

Il controllo delle condizioni termo-igrometriche della vetrina/teca costituisce sicuramente un aspetto cruciale per la conservazione degli oggetti al loro interno. Gli aspetti progettuali e di impiego, direttamente o indirettamente correlati ai parametri ambientali e micro-climatici, saranno trattati nel in accordo con quanto specificato nella normativa EN 15999, Linee guida per la progettazione di vetrine per l'esposizione e la conservazione di oggetti (Conservation of Cultural Heritage - Guidelines for design of showcases for exhibition and preservation of objects).

Aspetti generali

I materiali costituenti la vetrina

L'interazione e/o in alcuni casi anche il contatto tra gli oggetti esposti e i materiali di cui la vetrina è costituita devono essere attentamente valutati. La loro compatibilità deve essere valutata anche nel lungo periodo al fine di verificare possibili reazioni con gli oggetti conservati e che dovrebbero essere preservati. I materiali utilizzati per costruire la vetrina, ad esempio la struttura portante, i vetri, gli inserti, le vernici, i sigillanti, gli adesivi, le pitture, i tessuti, ecc., devono essere selezionati sulla base di protocolli di prova dei materiali professionalmente riconosciuti, o, anche se in modo meno affidabile, sulla base di un controllo di

tutta la documentazione disponibile (ad esempio, certificati di conformità, rapporti tecnici), o test realizzati ad hoc mediante procedure di invecchiamento accelerato, per esempio.

I criteri da prendere in considerazione, in base ai quali poter tenere assieme oggetti e “materiali”, sono:

a) il contatto tra oggetti e “materiali”, anche accidentale;

b) l'ambiente confinato della vetrina con ricambio d'aria ridotto tra l'interno e l'esterno dove i vapori nocivi emessi dai materiali o dagli oggetti presenti nella vetrina possono accumularsi. I materiali utilizzati dovrebbero essere attentamente valutati e selezionati in relazione alle condizioni termo-igrometriche a cui sono e saranno mantenuti. I materiali organici trasparenti (principalmente il polimetilmetacrilato) e alcuni altri prodotti hanno proprietà elettrostatiche e non devono essere utilizzati per oggetti con superfici polverose, evitati in caso di ambienti polverosi o mostre con alto tasso di polverosità.

Micro-clima all'interno delle vetrine

Lo spazio espositivo in una vetrina costituisce un microclima, che deve essere valutato e controllato e, se necessario, monitorato. Gli oggetti che si trovano nella stessa vetrina devono essere adatti a sopportare i livelli di temperatura e di umidità presenti; per questo motivo i manufatti con caratteristiche molto diverse non possono essere posti all'interno della stessa vetrina, o quanto meno nella stessa zona all'interno della stessa vetrina.

Nei casi in cui questa clausola sia pertinente, anche i materiali utilizzati nella costruzione della vetrina devono essere lasciati acclimatarsi prima dell'uso.

Il clima della sala di esposizione e il microclima interno alla vetrina sono in generale diversi, a questo scopo le vetrine devono essere dotate sia di una sigillatura ermetica che di dispositivi di controllo passivo o attivo che rendano possibile regolare e mantenere i livelli stabiliti di temperatura e umidità relativa.

Il controllo climatico della vetrina deve essere progettato dopo aver valutato i parametri dell'ambiente in cui questa sarà localizzata. Apparecchiature per il controllo attivo, come deumidificatori, umidificatori e unità di condizionamento dell'aria richiedono oltre ad una alimentazione elettrica anche un approvvigionamento di acqua. Nel caso di impiego di apparecchiature attive deve essere programmata una manutenzione periodica che nel caso di apparecchiature passive, per cui è previsto l'utilizzo di materiali tampone e/o di isolamento termico, può richiedere un impegno minore.

Il controllo climatico deve prevedere anche uno scambio d'aria con l'ambiente. La velocità con cui l'aria di una vetrina si scambia con quella ambiente influisce su molti aspetti delle sue prestazioni, in particolare sulla capacità di controllare l'umidità relativa al suo interno sulla diffusione/contaminazione da parte di inquinanti gassosi esterni dannosi e/o di particolato.

La gestione della separazione tra ambiente interno e ambiente esterno alla vetrina può essere fatta con il principio della tenuta, che tende a impedire o comunque a limitare gli scambi d'aria, applicando contemporaneamente impianti di trattamento dell'aria a ricircolo, o in sovrappressione la quale, al contrario, gestisce questi scambi intensificandoli, in un bilancio ovviamente favorevole al controllo dell'atmosfera interna.

Sostanze inquinanti, polveri e microrganismi possono essere assorbite/filtrate mediante appositi dispositivi, tali dispositivi possono essere utilizzati anche per assorbire gli inquinanti gassosi o composti organici volatili

(VOC) emessi all'interno della vetrina stessa. Questo assorbimento può essere eseguito con dispositivi passivi, ad esempio carbone attivo, allumina attivata, tessuti contenenti micro particelle di metallo, o con idonei filtri e una circolazione forzata dell'aria nella vetrina. È indispensabile anche per i materiali assorbenti è effettuare una manutenzione periodica dei prodotti assorbenti.

La polvere deve essere controllata utilizzando una vetrina con bassa velocità di scambio dell'aria o, nel caso di circolazione forzata dell'aria nella vetrina, con filtri appropriati.

Lo sviluppo di muffe può essere inibito impostando un adeguato livello di umidità relativa nella vetrina stessa.

Il concetto base di progettazione della tenuta nelle vetrine è la realizzazione di vetrine a tenuta costituite da un compartimento stagno intorno al volume espositivo, vero cuore della teca. All'interno del compartimento sono incluse anche:

- la parte del basamento che sta sopra al setto divisorio, appositamente inserito per la realizzazione del compartimento stagno;
- il cassetto del gel di silice, di cui vedremo in seguito l'importanza.

Nel volume a tenuta sono inseriti così anche molti elementi strutturali e funzionali, ad esempio le cerniere, escludendo invece tutti gli apparati che generano calore, come l'apparato di illuminazione, che deve essere in costante contatto con l'ambiente esterno per un facile smaltimento del calore prodotto per dissipazione elettrica. Tra gli elementi strutturali fissi vengono posizionate sigillature e guarnizioni di vario genere, nell'intento di raggiungere un isolamento particolarmente avanzato tra atmosfera interna e esterna alla vetrina.

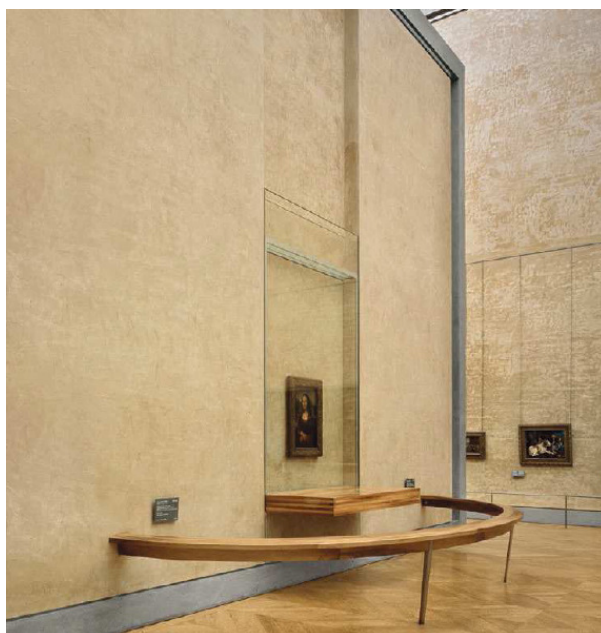


Fig. 1. Musée du Louvre, Salle des Etats, Monna Lisa, Paris (FR) – (tratto da “Goppion Tecnologia della vetrina. Per installazioni museali – seconda edizione)

Monitoraggio della temperatura e dell'umidità nelle vetrine per esposizioni museali

L'attività preliminare di monitoraggio consente di identificare le criticità presenti negli ambienti espositivi e all'interno delle teche, e di studiare soluzioni per il superamento delle criticità individuate o quanto meno della riduzione dei rischi correlati. Il monitoraggio in continuo permette di valutare e controllare le caratteristiche di funzionamento delle soluzioni progettuali proposte che sono in genere finalizzate a determinare particolari condizioni dei parametri ambientali.

Come si stabilisce un programma di monitoraggio?

Il programma di monitoraggio della temperatura e dell'umidità deve essere ben pianificato, insieme alla possibilità di immagazzinamento dei dati e all'elaborazione dei risultati. Molta letteratura è disponibile in questo contesto¹. La scelta del posizionamento dei sensori per il monitoraggio deve essere operata in collaborazione con i conservatori che possono contribuire a identificare le aree/punti di monitoraggio più opportuni a garantire che le informazioni raccolte siano rilevanti per la caratterizzazione dell'ambiente e la conservazione del manufatto. In generale:

- vicino agli oggetti da collezione;
- lontano da fonti di riscaldamento;
- evitare condizioni per le quali il ricambio di aria sia limitato (se non intenzionale);
- garantire l'accessibilità al sistema/sensore di monitoraggio per le opportune operazioni di manutenzione;
- assicurarsi che i sensori di monitoraggio siano calibrati.

L'individuazione di un responsabile del sistema di monitoraggio all'interno del museo garantisce una maggiore efficacia e correttezza nell'implementazione del programma, oltre a consentire al personale designato di acquisire familiarità con le apparecchiature, il loro posizionamento e il loro funzionamento. Questo è fondamentale per garantire una corretta manutenzione delle attrezzature e il controllo della taratura – apparecchiature non calibrate portano a letture imprecise e a risultati non affidabili.

Le vetrine possono essere monitorati a campione; non tutti le vetrine necessiterebbero di essere monitorati se sono costruttivamente identiche, ma è comunque fondamentale che ciascuna sia dotata di sistemi di controlli minimi tali da segnalare eventuali malfunzionamenti correlati anche ad eventi straordinari, mancanza dell'alimentazione, un evento meteorologico insolito o un elevato numero di visitatori. È utile confrontare i parametri monitorati all'interno delle vetrine con quelli ambientali in interno e in esterno. È buona pratica annotare i dati provenienti da letture dirette secondo protocolli prestabiliti.

Alcune considerazioni per pianificare un adeguato programma di monitoraggio:

- *Strumenti registrazione e strumentazione a lettura diretta.* Le unità di registrazione permettono di registrare con intervalli di tempo più brevi e periodi limitati dalla sola capacità di archiviazione dell'unità. I dati acquisiti direttamente devono essere trascritti di volta in volta.

¹ Beth Lindblom Patkus. The Environment. Monitoring Temperature and Relative Humidity, in Technical Leaflet, Preservation. Ed. NEDCC. www.nedcc.org/tleaf22.htm

- *Durata del monitoraggio.* Alcuni sistemi di registrazione sono in grado di archiviare dati per un anno, ma molto dipende dal periodo di campionamento scelto. Questi sistemi richiedono una manutenzione periodica (mensile/annuale).
- *Disponibilità del personale.* Gli strumenti a lettura diretta richiedono il coinvolgimento di personale, eventualmente formato, per tempi anche lunghi se l'attività è svolta su più contesti/siti. I sistemi di registrazione richiedono il coinvolgimento di personale ma i tempi del loro coinvolgimento sono inferiori. La convenienza si manifesta palesemente nel caso di monitoraggio per lunghi periodi.
- *Precisione.* La precisione e la frequenza di campionamento dei dati necessari per valutare la variabilità dei parametri (temperatura e umidità relativa) all'interno di una vetrina di esibizione deve essere maggiore rispetto a quello della variazione introdotta dal surriscaldamento introdotto dal sistema di illuminazione intero (se mal progettato).
- *Frequenza.* Alcune applicazioni richiedono un monitoraggio continuo, per esempio la valutazione iniziale dell'ambiente di un ambiente una vetrina di esibizione. Informazioni periodiche sono utili per altre applicazioni, come per valutare quando andare a sostituire il gel di silice, e in questo caso la frequenza di campionamento può avere una frequenza meno alta rispetto al primo caso.

Quali tipi di attrezzature sono disponibili allo stato dell'arte per controllare la temperatura e l'umidità relativa?

Le opzioni di base per la registrazione della temperatura e dell'umidità relativa sono:

- 1) le unità di lettura diretta
- 2) igro-termografi e data logger

Poiché la maggior parte dei programmi di monitoraggio prevedono che le vetrine siano chiuse, non tutte le opzioni elencate di seguito saranno adeguate.

1. Strumenti a lettura diretta:

- Psicrometri, sono strumenti impiegati per misurare l'umidità relativa dell'aria attraverso la misura della differenza della lettura di un termometro a bulbo asciutto e bulbo umido. Se utilizzato correttamente, le letture sono molto precise. Poiché le variazioni giornaliere possono essere notevoli, una sola lettura giornaliera limita l'accuratezza della misura. Lo psicrometro non è adatto per valutare l'umidità relativa di un ambiente confinato come quello di una teca.
- Le schede indicatore di colore sono dei cartoncini con applicate delle strisce di sali di cobalto che rispondono a differenti condizioni di umidità relativa. Queste soluzioni economiche possono essere utili nel monitoraggio di trends – come per il controllo dell'esaurimento del gel essiccante o del corretto funzionamento di attrezzature meccaniche - ma sono inadeguate per valutare le prestazioni di una vetrina.
- Sonde portatili a lettura singola e misuratori possono presentare diversi livelli di precisione.
- Termometri e igrometri a quadrante utilizzati per queste applicazioni sono abbastanza comuni, tuttavia, devono essere calibrati e la calibrazione deve essere controllata con cadenza regolare.

- Termometri e igrometri con lettura a LED a buon mercato con memoria integrata con alta o bassa capacità di raccolta dati sono una valida soluzione per registrare e verificare le condizioni del sistema di condizionamento microclimatico.

2. Apparecchiature di registrazione:

In alcuni casi queste apparecchiature sono necessarie solo durante il primo anno di installazione per la valutazione del corretto funzionamento delle vetrine :

- Gli igrotermografi a registrazione segnano la temperatura e l'umidità relativa su un tamburo rotante o disco sul quale è avvolta una carta graduata dove, sull'asse delle ascisse – nella direzione di svolgimento del rotolo – è indicato il tempo, mentre sull'asse delle ordinate è riportata una doppia scala con temperatura e umidità relativa, fornendo così sia una lettura continua che informazioni complete. Le unità raccolgono i dati da una settimana fino a diversi mesi. L'informazione tracciata sul grafico mostra le tendenze a lungo termine. Un igrotermografo richiede la calibrazione con un psicometro.
- I data logger di temperatura e umidità consentono di registrare ad intervalli di tempo stabiliti per circa massimo un anno (in alcuni casi anche di più). Tale limite dipende da diversi fattori principalmente: durata delle batterie, capacità di immagazzinamento dei dati e frequenza di campionamento. Un software di gestione permette il set-up dei data logger e la possibilità di scaricare i dati archiviati a fine registrazione. In alcuni casi è possibile rappresentare in grafico i dati registrati. Il loro impiego è molto efficace in quanto non richiedono molto tempo e impiego di personale. Il costo è in genere competitivo, in genere una seconda unità di rilevamento è utilizzata, in modo che un data logger registra i dati nell'ambiente esterno alla vetrina di esibizione e l'altro viene posto al suo interno.
- Sonde e misuratori elettronici portatili che consentono la registrazione dei dati, anche se possiedono unità di archiviazione di capacità limitate, possono essere impiegati. Questi tipi di misuratori elettronici possono essere talvolta trasformati in sensori a distanza utilizzando una connessione via cavo per un registratore off-line.
- Un sensore remoto collegato via cavo a un display grafico può essere molto utile per monitorare le vetrine di esposizione. Il sensore può essere montato all'interno della vetrina e collegato ad un display grafico su un lato accessibile della vetrina, in una posizione più comoda. Questo metodo è visivamente discreto ed elimina la necessità di aprire la vetrina per raccogliere i dati.
- Un trasmettitore remoto wireless collegato al sensore può essere impiegato all'interno della vetrina con il ricevitore collocato in una centralina di registrazione ubicata a portata del trasmettitore (nella stessa stanza o nelle immediate vicinanze).

La bassa pressione riduce la precisione delle apparecchiature, pertanto delle tabelle correttive devono essere utilizzate in alta quota (sopra 900 m)².

² Ann Hitchcock and Gordon C. Jacoby. (1980). Measurement of Relative Humidity in Museums at High Altitude. *Studies in Conservation*, 25, 78-86.

Prodotti, produttori e fornitori

La citazione del nome di un particolare prodotto, produttore o fornitore in questo contesto è puramente indicativa e non costituisce un'approvazione o una raccomandazione dello stesso prodotto o fornitore da parte da parte dall'autore. I materiali elencati sono stati utilizzati dall'autore con diversi gradi di successo in applicazioni precedenti. Il grado di successo è per lo più dei casi subordinato alla tipologia di problematica che si vuole caratterizzare che è indipendente dalla qualità del prodotto impiegato. Si suggerisce al lettore di prendere spunto da questo elenco per trovare attrezzature analoghe o con migliori prestazioni.

1. *Registratori remoti*

Omega Engineering Inc.

1 Omega Circle

Bridgeport, NJ 08014

Telephone: 609-467-4200

2. *Data loggers*

ACR SmartReader 2 Temp/RH Logger

(optional remote sensor)

Cascade Group

68 West Main Street

Oyster Bay, NY 11771

Telephone: 516-624-2900

Fax: 800-800-0588

Handwell wireless logger

Cascade Group

68 West Main Street

Oyster Bay, NY 11771

Telephone: 516-624-2900

Fax: 800-800-0588

TRAK-R Loggers

61 Brightside Avenue #A

Central Islip, NY 11722

Telephone: 516-582-1808

3. *Psicometri / termoigrometri*

Cole-Parmer Instrument Co.

625 E. Bunker Court

Vernon Hills, IL 60061

Telephone: 847-549-7600

Fax: 847-247-2929

4. *Igrometri con sensori a base di cellulosa*

Humidity Indicator

Humidial Corporation

PO Box 610

926 S. 8th Street

Colton, CA 92324

Telephone: 909-825-1793

Fax: 909-825-6271

Controllo della temperatura nelle vetrine di esposizione

Temperature elevate e instabili all'interno di una vetrina con rapide variazioni del contenuto di umidità possono portare a condizioni microclimatiche che accelerano il deterioramento dei materiali conservati all'interno delle teche. Il non adeguato progetto dell'impianto di illuminazione interno può essere la causa di tali rapide variazioni.

Perché il controllo della temperatura all'interno di una teca è importante?

La stabilità delle condizioni ambientali temperatura e umidità relativa rappresentano un obiettivo prioritario per la pianificazione della conservazione e per la progettazione delle vetrine di esposizione. Temperature estreme (25-26 °C sarebbero le condizioni di temperatura ottimali) e principalmente i repentini sbalzi di temperatura all'interno di una vetrina di esposizione sono responsabili dei principali danni visualizzabili sulle collezioni conservate in ambienti non idonei.

- Molte collezioni nei musei sono costituite da oggetti che a loro volta sono costituiti da materiali diversi e diversamente sensibili alle variazioni termiche (ovvero, non presentano lo stesso coefficiente di dilatazione termica e coefficiente di propagazione del calore) pertanto si espandono e si contraggono con differenti velocità. La differente risposta dei materiali può avere sull'oggetto nel suo complesso anche ripercussioni strutturali screpolature anche in profondità o semplicemente a livello della superficie come il sollevamento della pellicola pittorica, o la separazione degli strati di preparazione dal supporto.
- La variazione della temperatura influenza direttamente il contenuto di umidità dei materiali organici; come l'aria all'interno di un contenitore si riscalda e si raffredda, l'umidità relativa oscilla. Questo fa sì che analoghe dinamiche a quelle del punto precedente verificatesi per gli oggetti in esposizione a causa delle variazioni di temperatura possono innescarsi anche in relazione alle variazioni di umidità all'interno delle teche. Anche in questo caso per i materiali igroscopici possono verificarsi aumenti e contrazioni di volume differenziali tali da indurre lesioni anche a livello strutturale nell'oggetto conservato nella teca.
- Temperature elevate in combinazioni con condizioni igrometriche non ottimali accelerano molti processi di degrado chimico e di attività biologica, pertanto di crescita di microrganismi (insetti, funghi, batteri che contribuiscono a loro volta a degradare l'oggetto).
- Il riscaldamento spesso può avere effetti deleteri sulle superfici rendendole appiccicose, a causa di trattamenti applicati, ma anche per la natura dei particolari materiali costitutivi originali, oppure si possono verificare dei cedimenti o abbassamenti della struttura che provocano degli evidenti sprofondamenti della superficie.
- Il riscaldamento, e in particolare la velocità di riscaldamento, può causare danni anche se l'umidità relativa è mantenuta costante.
- Il rapido riscaldamento e raffreddamento può innescare all'interno della teca dei moti convettivi che aumentano il ricambio d'aria attraverso piccoli fori o fessure. Questo può a sua volta, esporre gli oggetti a polvere oppure ad altre rapide variazioni di temperatura e umidità relativa.

Quali possono essere le cause del surriscaldamento dell'interno di una teca?

Il calore può trasferirsi in base a 3 principi: 1) conduzione; 2) radiazione (infrarosso termico); 3) convezione.

- 1) Conduzione. Il calore può propagarsi da una sorgente esterna alla teca attraverso i materiali con i quali questa è realizzata. I materiali più densi, in generale, conducono il materiale in modo più rapido. L'impiego di materiali isolanti limita la propagazione del calore mediante questo principio.
- 2) Radiazione. Il calore viene in questo caso trasmesso dal moto delle onde elettromagnetiche in modo analogo alla luce, le radiazioni elettromagnetiche nell'infrarosso detto termico hanno una lunghezza d'onda tra 8-14 μm . L'energia elettromagnetica sotto forma di calore si trasferisce da un oggetto caldo come ad esempio una lampada o un'illuminazione sulla copertura della teca attraverso l'aria ad un materiale più freddo, come il piano di mostra o l'oggetto in esposizione.
- 3) Convezione. Il calore è trasferito mediante i moti convettivi dell'aria all'interno della teca da una zona più calda ad una più fredda. Il movimento dell'aria è causato dall'espansione dell'aria calda che sale, e l'aria più fresca che invece scende.

Tutte e tre le modalità possono coesistere all'interno di una teca. Anche se in una teca ventilata possono verificarsi fenomeni di surriscaldamento, si tratta di un problema più comune nel caso di teche sigillate e di solito il risultato è dovuto ad una delle tre seguenti cause:

- Posizione della teca all'interno dello spazio espositivo: per esempio la teca è posizionata vicino ad una bocchetta a parete per l'immissione o la presa dell'aria; oppure, si trova direttamente contro una parete esterna esposta a sud; oppure, troppo vicino ad una porta o finestra.
- Progettazione illuminotecnica: le luci si trovano all'interno della teca con una ventilazione insufficiente o inadeguata ; installazione di corpi illuminanti o apparecchi inappropriati; oppure, l'illuminazione sulla copertura della teca non è correttamente progettata.
- Interazione con apparecchiature vicine: le teche di esposizione sono esposte al calore di apparecchiature elettriche nelle immediate vicinanze, per esempio i reattori delle lampade a fluorescenza, reattori di luci a led, unità HVAC, o computer.

Come può essere limitato in fase progettuale il “surriscaldamento” all'interno delle teche?

Tra le peculiarità del progetto delle teche vi è sicuramente quello della prevenzione del surriscaldamento al suo interno. A questo scopo l'uso di materiali isolanti può essere necessario. Poiché l'aumento di temperatura è dovuto al calore generato dagli apparecchi illuminanti la loro scelta e posizionamento è determinante.

- Impiegare per la realizzazione della teca materiale conduttivo: è preferibile l'impiego di alluminio o lamiera piuttosto che legno. Questi materiali dissipano il calore verso l'esterno.
- Isolare l'area di illuminazione: L'area di illuminazione deve essere fisicamente separata dall'area della teca di esibizione in modo che il trasferimento di calore può essere controllato. Qualsiasi differenza tra le due camere destabilizza la temperatura della teca per convezione e riscaldamento conduzione.
- Ventilare l'area di illuminazione: la ventilazione nella parte superiore o la parte posteriore dell'area di illuminazione permette al calore dei corpi illuminanti di dissipare il calore da loro prodotto attraverso correnti convettive. L'impiego di una ventola di areazione può essere richiesto nel caso di un numero elevato di corpi illuminanti o in luoghi ristretti.
- Considerare l'utilizzo di doppi vetri (vetro isolante) tra le luci e l'area di esibizione: poiché la conduzione è il metodo di trasferimento di calore più efficace, l'individuazione di un materiale isolante tra le aree di illuminazione e di esibizione può essere un metodo pratico e a basso costo per ridurre il guadagno di calore dove le temperature elevate non possono essere evitate.
- Utilizzare materiali isolanti per la costruzione di elementi di teche soggette a surriscaldamento per effetto di apparecchiature adiacenti.

Può essere impiegata una semplice ventola per ridurre il riscaldamento indotto dal sistema di illuminazione?

Le piccole ventole di areazione (simili a quelle usate per PC), relativamente silenziose, possono essere installate nelle teche per dissipare il calore indesiderato. La ventola deve essere posizionata in prossimità

della zona più calda nelle vicinanze del sistema di illuminazione (generalmente in alto), con aperture ingressi per l'aria più fredda a un livello inferiore.

La portata della ventola si misura in CFM (Cubic Feet per Minute, oppure in italiano m³/h) e corrisponde al volume d'aria spostato da una ventola in un determinato intervallo di tempo.

Le prese d'aria o le aperture dovrebbero misurare non meno di 3 pollici quadrati (senza ostacoli) per CFM (Cubic Feet per Minute) di flusso d'aria. Se si applica una zanzariera sopra la presa d'aria la sua dimensione deve essere raddoppiata. L'ostruzione – eccessiva – della presa d'aria dai filtri troppo densi può causare il surriscaldamento del ventilatore.

Deve essere tenuto presente della presenza del rumore introdotto dai sistemi di ventilazione che può rappresentare un problema in certe condizioni. La scelta dei ventilatori dovrebbe essere indirizzata verso quelli con un livello di rumore non superiore a 30 dBA. Molti produttori di ventole offrono informazioni livello di rumore, così come le ore di funzionamento previste.

Come è possibile determinare i CFM necessari per la ventilazione?

1. Stabilire il guadagno di calore prodotto dalle lampade (o qualsiasi altra apparecchiatura elettrica in caso mostra) moltiplicando la potenza totale per 3,4 BTU per watt:

$$BTU = P[W] \times 3,4$$

2. Determinare il CFM richiesto dividendo il guadagno di calore in BTU per il prodotto tra la costante di conversione 1,08 e la differenza tra la temperatura in prossimità dell'area da ventilare e la temperatura obiettivo desiderata nella teca:

$$CFM = \frac{BTU}{1,08 \times (T_C - T_A)}$$

dove:

P = Potenza della sorgente di calore (corpo illuminante, generica apparecchiatura elettrica/elettronica)

BTU = British Thermal Units

CFM = Cubic Feet per Minute³

Tc = Temperatura iniziale della teca (°C)

Ta = Temperatura ambiente da ottenere a seguito del raffreddamento (°C)

1,08 = Costante di conversione

³ Tabella per la conversione da CFM a m³/h

Valore di input	Fattore di conversione	Risultato conversione
1 m ³ /h	x 0.58867	0.58867 CFM
1 CFM	/ 0.58867	1.69874 m ³ /h

Combinando le due relazioni si ottiene che il valore di CFM necessario può essere determinato dalla seguente:

$$CFM = \frac{P[W] \times 3,4}{1,08 \times (T_C - T_A)}$$

Ad esempio, nel caso di corpi illuminanti da 150 W, con una temperatura iniziale di 46 °C e una temperatura dell'aria ambiente di 40 °C, il CFM sarebbe:

$$CFM = \frac{150 \times 3,4}{1,08 \times (46 - 40)} = 78,7$$

Questo può essere fatto con un ventilatore da 80 CFM.

Se la temperatura fosse più alta, per esempio 50 °C potrebbero essere ancora accettabili:

$$CFM = \frac{150 \times 3,4}{1,08 \times (50 - 40)} = 47,2$$

Questo può essere fatto con un ventilatore da 50 CFM.

Questi esempi mostrano che più bassa è la temperatura desiderata nella teca, più grande è il ventilatore. La temperatura di partenza della teca può avvicinarsi alla temperatura dell'ambiente ma senza mai raggiungerla.

Come è possibile identificare un materiale isolante?

I materiali isolanti in commercio sono classificati sulla base del valore della resistenza termica per conduzione R e della conducibilità termica U .

Valori elevati di R indicano migliori proprietà isolanti, mentre più basso è il valore di U e maggiore sono le proprietà isolanti.

Una lista di materiali isolanti è riportata in tabella

Materiali con buone proprietà isolanti	
Per vetri	Per le pareti della teca
Vetro temperato	Polietilene espanso
Vetro triplo strato	Fibra di vetro
Vetro riflettente	Fogli metallici riflettenti

Queste informazioni sono contenute nella Technical Note scritta dai conservatori Toby Raphael e Nancy Davis come parte integrante delle Exhibit Conservation Guidelines a technical resource realizzate da National Park Service, e prodotte dalla Division of Conservation, Harpers Ferry Center.

Impostazione e controllo del parametro di umidità relativa

I criteri di conservazione che sono stabiliti dal conservatore sono i livelli di umidità relativa e temperatura ai quali possono essere esposti gli oggetti nella teca.

L'umidità relativa all'interno delle teche

Il ruolo significativo dell'umidità relativa nella conservazione degli oggetti è stato compreso dai professionisti che operano in contesti museali. Gli studi hanno mostrato come per ciascun oggetto, o tipologia di oggetti, vi fosse un'umidità relativa specifica per una migliore conservazione. Un valore di umidità relativa intermedia è stata scelta come compromesso per conservare materiali eterogenei. La raccomandazione generale frequentemente proposta negli ultimi anni era di conservare gli oggetti in un ambiente al 50% di umidità relativa ($\pm 5\%$). Negli ultimi anni gli scienziati di conservazione, come Stefan Michalski⁴ e David Erhardt hanno riesaminato le più rigide raccomandazioni climatiche del passato dal punto di vista dei costi rispetto al beneficio.

Infatti, data una collezione di oggetti eterogenei e i possibili estremi di variazione dei parametri ambientali, le migliori condizioni di conservazione si ottengono rimanendo nell'intervallo di umidità relativa $50\% \pm 20\%$ e di temperatura $26\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$; i dati sono estrapolati considerando un periodo di cento anni. Tagliare queste fluttuazioni a metà porta a dei benefici reali che si riducono per ulteriori decrementi delle fluttuazioni. È ragionevole attendersi che variazioni entro il $\pm 10\%$ di umidità relativa siano compatibili con sistemi meccanici commerciali. L'ulteriore riduzione della variabilità al $\pm 5\%$ non comporta un ulteriore miglioramento.

La comprensione delle migliori condizioni di conservazione per un ambiente museale è comunque in continua evoluzione.

- Mantenere il 50% di umidità relativa durante i mesi invernali provoca danni strutturali ad alcuni edifici.
- Una umidità relativa del 50% è inadeguato per climi tropicali e aridi
- Molti materiali da collezione sono più tolleranti alle variazioni di umidità di quanto si pensasse in precedenza.
- Non esiste un valore di umidità relativa ideale, ogni valore scelto è un compromesso tra vari fattori⁵.

Ciò che è ancora evidente è l'effetto che l'umidità relativa ha sulla maggior parte dei materiali da collezione. Anche se una fluttuazione di umidità del $\pm 5\%$ rende l'ambiente più stabile, molti oggetti non sono danneggiati da esposizioni ad un intervallo più ampio di variazione. Un modo pratico di stabilire un intervallo di umidità appropriato per un oggetto è di identificare sia la sua umidità relativa ideale e l'intervallo massimo di fluttuazione tollerabile e su questo mantenere un margine di sicurezza del 50%.

Questo definisce il parametro umidità relativa per quell'oggetto. I parametri possono essere ulteriormente raffinati identificando quanto velocemente l'umidità relativa può variare entro l'intervallo.

⁴ Stefan Michalski, Environmental Guidelines: Defining Norms for Large and Varied Collections, AIC Workshop Papers, Norfolk VA, June, 1996, p.28-33.

⁵ David Erhardt and Marion Mecklenburg, Relative Humidity Re-examined, Preventive Conservation: Practice and Theory and Research. Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress, London: IIC, 1994, p.32-38.

Come sono stabiliti i parametri di umidità relativa per particolari oggetti?

L'umidità relativa ottimale e l'intervallo di variazione accettabile dipendono dalla igroscopicità del materiale/i (sensibilità all'umidità relativa dell'ambiente) e la vulnerabilità degli oggetti; dalla posizione geografica del museo; e dalle circostanze legate al particolare contesto della mostra.

Categoria di sensibilità	Descrizione	Intervallo di variazione ammesso sull'umidità relativa ottimale
Categoria 1: Alte restrizioni	Dipinti, oggetti in avorio, oggetti con decorazioni in lacca	±5% rispetto al valore di umidità ottimale
Categoria 2: Restrizioni moderate	Oggetti di arredo, dipinti con pigmenti/materiali organici, oggetti etnografici	±10% rispetto al valore di umidità ottimale
Categoria 3: Basse restrizioni	Attrezzi agricoli in legno, cesti	±15% rispetto al valore di umidità ottimale
Categoria 4: Restrizioni minime	Vetro, ceramica, oggetti metallici anche decorati purché stabili	±20% rispetto al valore di umidità ottimale

Le precedenti categorie di oggetti e le variazioni di umidità relativa tollerate sono frutto dell'esperienza e delle considerazioni fatte dai conservatori quando stabiliscono i criteri di conservazione per la mostra.

Intervalli stretti di umidità relativa sono necessari per oggetti igroscopici molto sensibili alle variazioni di umidità ambientale (variazioni dimensionali, colorimetriche, ecc.). Questa categoria, denominata categoria 1 nella tabella, richiede l'intervallo di umidità relativa più stretto e comprende, per esempio, lacche, rotoli di carta giapponese, tavole dipinte in legno, oggetti metallici instabili, e oggetti in vetro instabili. Categoria 4 raccoglie i materiali meno sensibili alle variazioni di umidità relativa e comprende materiali lapidei "stabili" e oggetti in vetro stabili.

È utile osservare che per oggetti della stessa categoria i valori di umidità relativa ottimale possono differire, infatti le categorie sopra definite si riferiscono a materiali reattivi rispetto alle **stesse variazioni** di umidità, ma non rispetto allo stesso valore di umidità relativa ottimale.

A seconda della varietà di oggetti scelti per la teca, potrebbero essere necessari diversi livelli di umidità relativa. A questo scopo all'interno della teca possono essere realizzati efficacemente microclimi diversi così da soddisfare i diversi requisiti. (Vedi tabella sotto)

COLLEZIONI GENERALI	attacchi biologici											
	meccanici											
	Sali											
	edifici											
	metalli											
	cellulosa											
	proteine											
CASI SPECIALI	minerali											
	vetri instabili											
	idrati											
COLLEZIONI COSTUMI	attive											
	documenti di archivio											
	Umidità Relativa	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
		condizioni ottimali			condizioni di attenzione				condizioni da evitare			

Gel di silice cosa sono e come usarli

Il gel di silice, formalmente $(\text{SiO}_2)_n$, è il termine comunemente utilizzato per la silice colloidale, un polimero del diossido di silicio, sfruttata per le sue proprietà disidratanti ed estremamente adsorbenti.

I prodotti per assorbire l'umidità, come il gel di silice, possono essere impiegati nelle vetrine per controllarne l'umidità relativa. Questo grazie al fatto che il gel di silice può agire sia come assorbitore di umidità che viceversa, **bufferizzando** il microclima della vetrina, eliminando così i livelli eccessivamente bassi o alti di umidità relativa nell'ambito della giornata, fluttuazioni settimanali e stagionali.

Che cos'è il gel di silice?

Il gel di silice è un materiale cristallino duro, inerte, disponibile in grani, polvere, o forme di perline sferiche. In commercio è disponibile all'interno di contenitori di materiale a base di carta o materiale polimerico. Il gel di silice è non infiammabile, non corrosivo e non tossico. In ogni caso è utile evitare di inalare la polvere del gel di silice. Deve essere tuttavia sottolineato che i materiali usati per il contenitore possono essere infiammabili o emettere sostanze volatili inappropriate.

Ci sono due tipi di gel di silice, standard e ibrido:

- il gel di silice tradizionale è in forma di cristalli (2-5mm di diametro) e sono stati sviluppati come catalizzatore in sintesi industriali, come componente attivo negli essiccatori ed in genere in tutti quei processi che richiedano un disidratante solido, di forza moderata, non tossico e di facile utilizzo. Nell'ambito della conservazione nei musei sono stati impiegati per decenni come essiccanti per mantenere l'umidità relativa a livelli più bassi possibili.
- gel ibridi sono stati sviluppati per essere altamente efficaci sia come assorbitori di umidità residua che per il rilascio dell'umidità nel caso di ambiente molto secco. Gel ibridi sono adatti per mantenere un livello medio di umidità relativa (40-70%).

Come può essere impiegato il gel di silice?

Il gel di silice può assorbire fino al 40% del suo peso a livelli elevati di umidità. La sua capacità di adsorbire l'umidità dall'ambiente in cui si trova si basa sulla sua elevata porosità quindi sulla grande superficie di scambio costituita dai pori superficiali e da pori micro interstiziali, traducendosi in una elevata area di scambio di materia disponibile. Le molecole d'acqua polari sono attratte dai gruppi di silicio e assorbite per capillarità nei pori, e vengono trattenuti fino al loro rilascio (**Fig. 2**). Il gel di silice può essere utilizzato per mantenere un determinato livello di umidità relativa (ad esempio a un livello basso, secco) o per mantenere il valore dell'umidità all'interno di un determinato intervallo (ad esempio a livelli tra 40 e 60%).

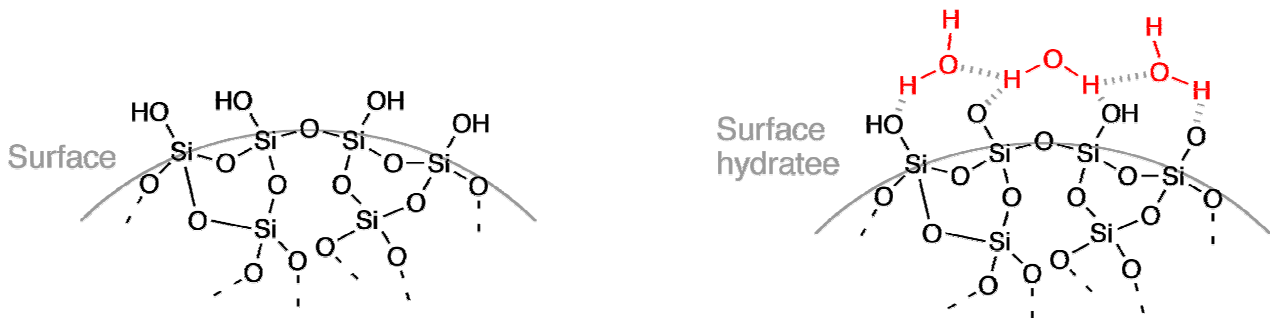


Fig. 2. Schematizzazione del principio di adsorbimento dell'acqua nel gel di silice

Prima dell'uso, il gel deve essere condizionato all'umidità desiderata.

L'efficacia del gel di silice dipende:

- la vetrina deve essere ben sigillata, con poca o nessuna perdita d'aria verso l'ambiente circostante;
- deve possedere un vano sufficientemente ampio per lo stoccaggio di una quantità adeguata di gel, e facilmente accessibile per la sua manutenzione. Per esempio può essere nascosto dietro un pannello nella parte inferiore, sul soffitto, sui lati, o sul retro della vetrina;
- deve essere presente un ricircolo di aria all'interno della vetrina e deve investire il gel di silice;
- gel di silice non dovrebbe mai toccare oggetti da collezione, e non si dovrebbe toccare il gel con le mani nude;
- distribuire il gel su una superficie il più ampia possibile;
- temperatura; i gel di silice assorbono meglio a temperature inferiori a 25 °C (77 °F).

Come scegliere il tipo di gel di silice?

Gel di silice standard è disponibile in molte classi e dimensioni dei grani; come selezionare il prodotto? L'indicazione della necessità del ricondizionamento attraverso il cambio di colore (ad esempio, da blu a rosa nel caso del gel di silice a base di Cloruro di Cobalto, oggi considerato tossico) è un requisito necessario. Il gel di silice è classificato in base alla porosità e alle dimensioni dei grani. In generale, il gel di silice indicato con Grade 42 è molto adatto per molte applicazioni museali. Questo può essere miscelato con il meno costoso gel di silice Grade 40 che ha circa le stesse dimensioni dei grani o con un gel ibrido. Devono essere evitati gel in polvere molto fine. I gel di silice standard funzionano bene come essiccante.

I gel ibridi, in generale, sono più costosi ma più efficaci nel mantenere l'umidità relativa attorno al 40-70%. Perciò, è utile determinare l'umidità necessaria prima di scegliere il tipo di gel da usare. I gel ibridi (come

Art-Sorb e Arten gel) possono essere utilizzati in più piccole quantità rispetto ai gel essiccanti standard e sono disponibili in una vasta gamma di proprietà di assorbimento. Lo svantaggio è che i gel ibridi non possono essere acquistati con un indicatore di colore.

Quanto gel di silice deve essere utilizzato?

Diversi fattori influenzano la quantità di gel di silice necessaria per una specifica teca. Il produttore di gel dovrebbe essere consultato rispetto al corretto impiego dei gel.

Applicando una regola “generale del pollice” per stabilire la quantità di gel ibrido per tamponare l’umidità all’interno di un ambiente confinato in condizioni museali normali è la seguente (questo presuppone delle condizioni dell’ambiente con un differenziale di umidità relativa del 20% rispetto all’interno): da 1/4 a 1/2 lb (1 lb = 0,45 kg) di gel per ft³ (1 ft = 0,30 m).

Bibliografia

- [1] L. Bacon, G. Martin (2000). *Out of Africa! Display case strategies - the theory and the reality*. Special Issue: Contributions to the Melbourne Congress, 10-14 October 2000. Tradition and Innovation: Advances in Conservation. Eds A. Roy and P. Smith. *Studies in Conservation*, 45(1), 18-23.
- [2] D. Camuffo, G. Sturaro, A. Valentino. (2000). Showcases: a really effective mean for protecting artworks? *Thermochim. Acta*. 365, 65-77.
- [3] M. Cassar, G. Martin. (1994). The environmental performance of museum display cases. *Special Issue: Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress, 12-16 September 1994. Preventive Conservation: Practive, Theory and Research*. Eds A. Roy and P. Smith. *Studies in Conservation*, 39(2), 171-173.
- [4] J. Tetrault. (1994). Display materials: The good, the bad and the ugly. In: Exhibitions and Conservation. Preprints of the Conference held at the Royal College of Physicians, (SAGE J., ed.). SSCR, Edinburgh, 79-87.
- [5] D. Thickett, F. David, N. Luxford. (2006). Air exchange rate - the dominant parameter for preventive conservation?, *In The Conservator*, 29, 19-34.

La luce artificiale e la sua applicazione nel progetto espositivo

La conservazione preventiva delle collezioni museali rappresenta uno tra gli obiettivi prioritari nella progettazione degli ambienti e degli allestimenti espositivi. Il concetto di conservazione va oltre la protezione da danni esterni quali vandalismi e furti ma intende fornire anche i mezzi per proteggere dal deterioramento naturale il materiale esposto.

L'utilizzo di vetrine espositive costituisce a tutt'oggi la risposta più efficace per la protezione delle opere d'arte e altri manufatti, in particolare oggetti con pigmenti, coloranti o inchiostri, materiale organico di qualsiasi tipo e di ogni datazione.

La teca di qualità museale, infatti, consente la creazione di un microclima monitorabile e su cui si può intervenire anche con interventi minimali ma efficaci.

Nell'ambito degli elementi ambientali che influenzano profondamente la durabilità di un bene esposto, primaria importanza assume la luce, sia naturale che artificiale.

La luce è composta da uno spettro di radiazioni molto più ampio di quello percepito dalla vista: solo alcune lunghezze d'onda infatti sono visibili dall'occhio umano e tra quelle non visibili ci sono i raggi ultravioletti (di seguito UV) e gli infrarossi. I raggi UV non possono essere percepiti in alcun modo a livello sensoriale ma vengono comunque assorbiti dai sistemi biologici e possono portare a importanti modificazioni del sistema colpito; ne sono ormai noti gli effetti nocivi a medio e lungo termine per gli essere viventi, i raggi UV sono infatti colpevoli di danni alla salute ed in particolare alla pelle, provocando tumori cutanei, fotoaging (invecchiamento della pelle), fenomeni di fototossicità e fotoallergia.

I raggi UV hanno anche un secondo effetto negativo: colpendo un oggetto mettono in atto un meccanismo chimico che porta alla produzione di perossido di idrogeno, il quale provoca un effetto sbiancante. A seguito della produzione di perossido di idrogeno, si interrompono i legami del cromoforo (ossia un raggruppamento, spesso formato da atomi uniti con legami multipli, presente nelle molecole e responsabile dell'assorbimento della radiazione elettromagnetica nel campo del visibile che dona il colore all'oggetto) cui consegue anche una modifica del colore naturale dell'oggetto esposto; il risultato è quell'effetto sbiadito sui colori o alterato, come ad esempio l'ingiallirsi di tessuti bianchi in cotone.

La Norma UNI 10829 (1999) "*Beni di interesse storico e artistico. – Condizioni ambientali di conservazione – Misurazioni e analisi*" è molto chiara nel definire i materiali più o meno sensibili ad agenti aggressivi.

In generale, i materiali di origine organica (carte e cartoni, papiri e pergamene, legni e fibre vegetali, tela e tessuti, pellami, pigmenti vari) sono i più danneggiabili. Non sempre si prende in considerazione l'effetto fotochimico della luce ed in particolare la sua valenza spettrale. Questo effetto può produrre danni rilevanti in quei materiali o in quelle sostanze che sono sensibili alla radiazione visibile.

I danni tipici da attribuire all'azione dell'illuminamento, con maggiore frequenza riscontrati, sono così riassumibili: scolorimento dei pigmenti, scollamento degli strati pittorici, screpolatura delle vernici, dei rivestimenti e dei ricoprimenti, cedimento dei supporti, perdita di resistenza meccanica delle fibre dei tessuti o dei supporti lignei. Si tratta di fenomeni provocati dalle radiazioni UV e da una parte delle radiazioni visibili. Le radiazioni infrarosse causano prevalentemente dilatazioni di strutture e supporti con conseguenti tensioni meccaniche, riduzione dell'umidità relativa dei materiali e conseguente fragilità dovuta all'inaridimento del microclima interno.

La normativa di settore (cfr. norma **UNI CEN/TS 16163:2014** : "**Conservazione dei beni culturali - Linee guida e procedure per scegliere l'illuminazione adatta a esposizioni in ambienti interni**") specifica che l'illuminamento non deve superare il valore di 50 lx per tutti i reperti a fotosensibilità media (ad es. dipinti con leganti a tempera, costumi, acquerelli, pastelli, arazzi, stampe e disegni, manoscritti, miniature, carta da parati, guazzo, pelli tinte e la maggior parte di oggetti naturali storici inclusi i campioni botanici, pellicce e piume) o alta (ad es. seta, inchiostri, coloranti e pigmenti ad alto rischio di scoloritura, giornali). Metalli, pietre e ceramiche, vetri, quando non siano trattati con vernici o smalti, non subiscono alterazioni anche con illuminamenti superiori a 150 lx, valore limite indicato anche per molte opere pittoriche a fotosensibilità bassa (affreschi, quadri su tela con pigmenti a tempera o a olio).

Nelle strategie della conservazione e valorizzazione del patrimonio artistico di particolare importanza è lo studio dell'illuminazione anche ai fini dell'allestimento espositivo.

Uno studio attento alle applicazioni della luce, naturale o artificiale che sia, permetterà di sottolineare le peculiarità tecniche ed estetiche di ogni singolo oggetto. Tale studio opererà attraverso una serie di test e prove su modelli e simulazioni in loco per permettere a tecnici e progettisti di definire quantitativamente e qualitativamente i dispositivi che illumineranno gli oggetti in modo puntuale e circoscritto, evitando così inquinamenti luminosi, riflessi fastidiosi ed effetti indesiderati.

Per una profonda comprensione della natura della luce è importante partire dalla conoscenza della sua natura fisica e dei meccanismi di propagazione, specialmente per la scelta dei dispositivi illuminanti più adatti da inserire nel progetto. E' però anche evidente che lo studio della luce, nello specifico campo della fruizione delle opere esposte in una mostra, non è da considerare in termini astratti o puramente energetici, ma va piuttosto posto in relazione agli effetti e agli stimoli sensoriali ed emozionali sulla persona ed in generale al rapporto dell'illuminazione con le comuni attività umane.

La curva della visibilità, cioè il range di percezione della luce da parte dell'occhio umano, varia in funzione del singolo osservatore e delle condizioni di visibilità.

Pertanto una valutazione soggettiva risulta indefinibile se non tramite parametri statistici, desunti da studi che hanno coinvolto un campione di popolazione che tramite un questionario ha fornito dati sulla percezione personale della qualità della scena luminosa in ambiti espositivi, consentendo di approfondire i risultati dell'indagine oggettiva (cioè tramite strumentazione). Tali informazioni integrano l'applicabilità degli attuali standard sull'abbagliamento e sulla resa cromatica, definiti da normative internazionali.

Ricordiamo che all'aumentare del livello di illuminamento aumenta la capacità dell'occhio di distinguere particolari di piccole dimensioni (acuità visiva), perciò il livello di illuminamento è considerato universalmente il requisito base per lo svolgimento di qualsiasi attività umana ed i livelli necessari sono stabiliti da enti normativi.

Il flusso luminoso è uno dei più importanti dati per la caratterizzazione delle lampade. L'ordine di grandezza dei flussi delle sorgenti normalmente utilizzate può andare da poche decine di lumen (LED) ad alcune centinaia (lampade a filamento di bassa potenza) e può arrivare a migliaia di lumen per lampade a scarica di potenza. Perciò la progettazione degli allestimenti non può prescindere dal proporzionare la quantità e la qualità dell'apporto luminoso a dipendere dalla natura dei materiali esposti.

Il colore e la sua percezione

Come è noto, il colore percepito dipende sia dallo spettro della radiazione incidente, sia dalle proprietà dell'oggetto. L'apparato visivo e percettivo dell'uomo associa all'interazione tra luce e oggetto una sensazione di colore che si definisce apparenza cromatica e che produce gli effetti esemplificabili, sono possibili variazioni cromatiche indotte da luce diretta, ombre proprie o proiettate e riflessi.

Ogni fonte luminosa (artificiale e naturale), quando viene osservata direttamente, presenta una sua tonalità di bianco, più o meno "calda" o "fredda", in funzione delle radiazioni che sono presenti nel suo spettro. Si usa la grandezza "temperatura di colore" (unità di misura il kelvin, simbolo K) per dare una quantificazione alla tonalità del bianco. Quando varia il valore di questa grandezza cambiano anche i colori riflessi dell'opera.

A prescindere dalla capacità personali di distinguere un colore, la valutazione fisica avviene in base allo spettro di riflettanza, cioè la percentuale di luce che viene riflessa per ogni lunghezza d'onda dal materiale colpito dalla luce.

Questa apparenza varia sensibilmente al variare dello spettro della luce anche se l'oggetto reagisce in modo omogeneo, e tuttavia vi sono oggetti che reagiscono con un comportamento, detto metamero, capace di

determinare apparenze cromatiche straordinariamente differenti a dipendere da l'angolo d'incidenza della luce.

In genere, i colori riconosciuti come reali sono i colori percepiti alla luce naturale, dotata di elevata intensità e di spettro continuo. L'osservatore medio non è cosciente di come e quanto si modifichi l'apparenza cromatica di un oggetto esposto alla luce naturale, la quale ha, come caratteristica tipica, grande variabilità di intensità e spettro. La luce proveniente dal cielo e quella proveniente dal sole provocano apparenze cromatiche sostanzialmente differenti anche in corpi con spettro di riflessione elementare: per esempio, la neve appare bianca dove è illuminata congiuntamente da sole e cielo, azzurra dove riceve solo luce dal cielo, ovvero nelle zone che definiamo in ombra.

In assenza di comportamenti palesemente metamerici, l'osservatore medio si aspetta da ogni oggetto una sensazione di colore che rientri nell'insieme delle apparenze cromatiche prodotte dall'esposizione alla luce naturale. Quando la percezione non corrisponde a tale aspettativa, l'effetto produce un giudizio più o meno inconsapevole: se il colore viene enfatizzato senza che la scena circostante sia alterata, il colore percepito viene assunto come reale e in generale bello, altrimenti è giudicato falso e brutto.

Per far apparire il vero colore dell'oggetto, è necessario che lo spettro della luce contenga in uguale misura tutte le radiazioni capaci di essere riflesse dall'oggetto; se la luce ne contiene solo una parte, o se una parte risulta particolarmente debole, il colore dell'oggetto cambia. Il processo è analogo per corpi che invece di riflettere la luce la trasmettono, ovvero sono trasparenti o traslucidi, oppure per corpi che ri-emettono con processi di fotoluminescenza, come le gemme.

Gli effetti descritti risultano tanto più enfatizzati quanto più lo spettro del corpo illuminato è ristretto, ovvero tanto più le lunghezze d'onda delle radiazioni che il corpo rinvia, trasmette o ri-emette, si addensano in un picco. Molte materiali hanno picchi di assorbimento e/o trasmissione molto stretti e quindi, se illuminate da una luce povera in quella zona, il loro colore appare incupito, se non addirittura alterato.

Valori di illuminamento, dose di luce e irradianza UV

Per quanto riguarda i parametri di controllo dell'esposizione alla luce delle opere (illuminamento, dose di luce annua e irradianza UV), il sistema di illuminazione adottato dal Progettista dovrà garantire il rispetto dei valori massimi consigliati (o definiti dai Conservatori) in funzione della categoria di fotosensibilità dei materiali e degli oggetti esposti in ciascuna vetrina.

Prendendo in considerazione la categoria "alta fotosensibilità", in particolare si dovrà poter garantire sulle opere un illuminamento non superiore a 50 lux e una dose di luce annua inferiore a 150.000 lux h/anno. Il sistema di illuminazione non dovrà causare incrementi di temperatura dell'aria all'interno della vetrina superiori a 1.5°C passando dalla condizione "off" alla condizione "on" (e sino a condizioni termiche di regime). L'irradianza UV dovrà essere inferiore a 75 $\mu\text{W}/\text{lm}$.

La luce artificiale, selezione e applicazione

Fare risaltare il singolo oggetto proponendo allo stesso tempo un'interazione con l'ambiente è lo scopo principale della ricerca dell'illuminazione in uno spazio espositivo: concentrare l'attenzione sulle opere esposte, ma anche integrarle con l'allestimento degli spazi che ospitano l'esposizione. La cosa risulta particolarmente evidente nel nostro paese dove le sedi museali sono spesso esse stesse di grande valore storico ed artistico.

La scelta dei sistemi di illuminazione, specie per le vetrine espositive, dipende da diversi fattori, quali la natura delle collezioni, le esigenze di esposizione o le caratteristiche dimensionali e formali degli espositori

Alla scelta finale del tipo di illuminazione da impiegare si dovrà come già accennato, far riferimento ad un'attenta valutazione degli effetti di degrado indotti da queste sorgenti luminose su materiali con classi differenti di fotosensibilità.

Le condizioni che governano la percezione degli oggetti, e gli effetti dannosi che questi ultimi possono subire, dipendono entrambi dalla quantità e dalla qualità spettrale del flusso luminoso: queste proprietà concorrono del resto a un'azione sinergica, che determina effetti affatto diversi sia nella qualità della fruizione che nella conservazione.

Vi sono materiali che si alterano con minime quantità di energia, altri che ne subiscono quantità elevatissime senza patire danno, ma la corretta percezione di entrambi i tipi dipende in modo particolare dalla distribuzione spettrale del flusso energetico ricevuto.

Per restare dunque nell'ambito museale, l'impianto d'illuminazione viene usato spesso, oltre che per illuminare direttamente il materiale esposto, anche per i pannelli descrittivi o anche solo per evidenziare il percorso espositivo. Bisognerà, quindi, sempre pensare al fatto che la parete vetrata di separazione, qualunque sia la tipologia di teca, possa produrre fastidiosi riflessi.

La soluzione più comune è che la parete potenzialmente riflettente possa essere trattata con film antiriflesso e comunque non esposta direttamente al flusso emesso dalle sorgenti luminose o alle riflessioni speculari delle superfici contenute entro lo spazio di esposizione.

Sono chiaramente da evitare tutte le condizioni di discomfort visivo legate all'abbagliamento diretto ed alle riflessioni sull'involucro trasparente. E' quindi sempre consigliabile l'uso di diffusori per evitare l'abbagliamento diretto, laddove il corpo illuminante sia posizionato in prossimità di superfici riflettenti, in particolare è da valutare l'angolo di incidenza del flusso luminoso sulle superfici.

La retroilluminazione, dove adottata, dovrà essere perfettamente uniforme e non dovranno essere visibili eventuali discontinuità.

Nella scelta delle sorgenti luminose, un aspetto progettualmente importante è il contenimento dello sviluppo di calore, specie in prossimità di manufatti di particolare delicatezza .

I dispositivi illuminanti e il controllo del microclima interno

Gli interventi legislativi hanno cercato di stabilire alcuni criteri di minima per limitare i possibili danni, La norma UNI 10829 integrata da *UNI CEN/TS 16163:2014* prescrive una metodologia per la misurazione nell'ambito delle grandezze ambientali termo-igrometriche e di illuminazione ai fini della conservazione di beni di interesse storico ed artistico e fornisce indicazioni relative alle modalità di elaborazione e sintesi dei dati rilevati per una loro valutazione finalizzata al contenimento dei processi di degrado.

- Dose annuale di luce: Quantità di luce che un oggetto riceve nell'arco di un anno, ottenuta sommando i valori di illuminamento relativi ad ogni ora dell'anno.
- Quantità di radiazione ultravioletta: Componente energetica ultravioletta presente nella radiazione luminosa rapportata alla componente visibile della stessa.

Un umidità relativa troppo alta può causare la presenza di muffe ed altri agenti patogeni che potrebbero ingenerare effetti di corrosione; Un umidità relativa troppo bassa può indurre fragilità in alcuni materiali e ingenerare elettricità statica che potrebbe attirare polveri che possono provocare a loro volta fenomeni corrosivi.

Occorre conoscere e monitorare le variazioni dell'umidità relativa e della temperatura lungo l'alternarsi delle stagioni per poter formulare una scheda in cui andranno annotati i dati concernenti le variazioni di

queste grandezze per poter proporzionare gli interventi atti a ridurre gli effetti negativi legati alla natura del materiale. La temperatura dell'aria interna ed il suo grado di umidità sono interdipendenti, è quindi impossibile separare gli effetti nelle possibili alterazioni.

Se un materiale è sensibile all'azione fotolitica (cioè alla decomposizione chimica per effetto della luce con conseguente degradazione di coloranti e pigmenti), i processi saranno accelerati in presenza di un grado di umidità più elevato.

Da tutto questo si desume la grande importanza sia del controllo della durata dell'esposizione delle collezioni alla luce naturale od artificiale, in misura commisurata alla sensibilità degli oggetti alle radiazioni luminose, sia della necessità di provvedere ad un opportuno filtraggio ed al contenimento dei valori di intensità luminosa concentrata, nonché di evitare contrasti di luminosità sull'opera, mirando il più possibile ad una illuminazione diffusa e omogenea.

La letteratura corrente indica in 70 milioni di lux-ora la soglia oltre la quale i pigmenti possono subire un danno irreversibile. La media annua di lux-ora di illuminazione di un reperto esposto ad un valore medio di 150 lux dovrebbe essere compreso tra i 400.00 ed i 500.000, calcolati all'interno degli orari d'apertura dell'esposizione. Ovviamente la soluzione più efficace per evitare problemi dovuti ad una esposizione prolungata è il contenimento degli orari di visita e la rotazione del materiale delle collezioni.

Inutile e a volte pericoloso è l'uso di sensori atti ad accendere e spegnere il dispositivo illuminante solo in presenza di pubblico, poiché potrebbero ingenerare sbalzi di temperatura che se protratti potrebbero seriamente danneggiare il materiale esposto.

Dispositivi illuminanti

Per quanto detto finora, possiamo indicare come nell'illuminazione espositiva divengano essenziali l'intensità e lo spettro della luce. All'intensità si deve l'enfaticizzazione degli effetti di rinvio, trasparenza e brillantezza, nonché il riflesso nei metalli e nelle superfici lucide e più in generale la percezione del colore. Allo spettro della luce si deve l'apparenza cromatica. E' perciò evidente che, per ottenere una buona percezione di tutte le particolari sfumature delle tele e degli arazzi, nonché delle pietre e dei metalli, l'ideale è costituito da luce di elevata intensità e di spettro continuo.

Nella tradizione espositiva la sorgente prediletta è stata la lampada a incandescenza, l'unica in grado di irradiare tutte le lunghezze d'onda dello spettro visibile.

Altri tipi di lampade, come ad esempio le lampade fluorescenti o a ioduri metallici, vengono usati più raramente, sia per le loro maggiori dimensioni, sia perché presentano uno spettro a righe che può penalizzare l'apparenza cromatica. Sistemi illuminanti a fibre ottiche o led stanno via via prendendo piede perché emettono luce fredda depurata dalle lunghezze d'onda nocive per i materiali e offrono una versatilità sempre più ampia data dalle dimensioni ridotte e dall'evoluzione della tecnologia che ne sta ampliando il campo di utilizzo.

Grazie alla presenza di più punti luce orientabili, entrambi le tipologie permettono di creare un'illuminazione omogenea, diffusa, oppure un'illuminazione d'accento, ad esempio per evidenziare un oggetto particolare anche di piccole o medie dimensioni o anche solo per sottolineare un dettaglio.

Lampade ad incandescenza

Da sempre, nella tradizione espositiva, la sorgente prediletta è stata la lampada a incandescenza, l'unica in grado di irradiare tutte le lunghezze d'onda dello spettro visibile e quindi di interagire pienamente con ogni tipo di materiale. L'uso dell'incandescenza non è tuttavia privo di problemi: la ridotta efficienza impone potenze elevate provocando il surriscaldamento di piccoli volumi d'aria come quelli tipici di teche e vetrine; la notevole radiazione infrarossa, che viene irraggiata assieme alla luce, innalza la temperatura di pietre e metalli rischiando di produrre tensioni e dilatazioni ; flussi luminosi ridotti possono non rendere a

sufficienza colori con una forte componente di radiazioni comprese nella banda del blu.

Lo spettro delle lampade a incandescenza, è uno spettro a rampa, più o meno pendente secondo la temperatura raggiunta dal filamento, e il flusso emesso nella banda dei blu è comunque sempre ridotto. Se la potenza emessa non è molto elevata, questo fatto penalizza in particolare l'apparenza cromatica di gemme blu scuro, come alcuni tipi di zaffiri, che appaiono allora quasi neri.

La figura seguente mostra lo spettro dell'incandescenza.

Inserire figura “spettro incandescenza.jpg”

I vantaggi:

- spettro luminoso simile a quello solare

Gli svantaggi:

- Dimensioni
- Alto consumo energetico
- Lunga durata
- Sviluppo di calore

Lampade fluorescenti

Le lampade fluorescenti sono disponibili in un'illuminazione indiretta o grande area per l'uso, nonché oggetto, vetrine e l'illuminazione del negozio.

Altri tipi di lampade, come ad esempio le lampade fluorescenti o a ioduri metallici, vengono usati più raramente, sia per le loro maggiori dimensioni, sia perché presentano uno spettro a righe che può penalizzare l'apparenza cromatica di molte gemme. La figura di seguito riporta alcuni spettri tipici di lampade fluorescenti, dove si osserva la predominanza di alcune lunghezze d'onda: il colore di gemme con spettri molto piccati, se illuminato da lampade simili, può dunque cambiare notevolmente se i picchi del suo spettro non corrispondono a quelli della lampada.

Inserire figura “spettri_fluorescenti.jpg”

I vantaggi:

- Basso consumo energetico ad alte prestazioni
- Lunga durata

Gli svantaggi:

- Maggiori dimensioni
- Relativo sviluppo di calore

Illuminazione alogena

L'illuminazione alogena è particolarmente adatta per creare sfondi uniformi, illuminazione di oggetti e vetrine dall'alto e come illuminazione commerciale.

vantaggi:

- radiazioni UV ridotte attraverso speciali filtri
- feritoie di ventilazione o diffusore impedisce l'abbagliamento diretto

LED (Light Emitting Diode)

La diffusione dei LED (Light Emitting Diode), è notevolmente aumentata arricchendo la scelta di sorgenti luminose: il rapido sviluppo della tecnologia promette sempre maggiore potenza e qualità spettrale, per queste sorgenti si preannuncia un sempre maggiore successo, anche per la forte adattabilità dovuta alle ridotte dimensioni del corpo illuminante.

Rispetto agli altri sistemi più tradizionali, come le lampade alogene o quelle fluorescenti, il LED produce luce tramite elettroluminescenza, non necessita né di riscaldare filamenti né di eccitare vapori. Al contrario l'energia elettrica è convertita direttamente in luce evitando così di disperdere la quasi totalità dell'energia in calore o di essere fortemente vincolato al variare della temperatura, ma soprattutto riducendo in modo drastico il consumo energetico. In alcuni casi, a parità di luce emessa, il LED consuma fino al 90% in meno rispetto alle lampade alogene.

C'è un altro aspetto che rende il LED eco-sostenibile: la sua durata nel tempo.

Una lampada a LED può superare le 50.000 ore di utilizzo, contro le 2.000 ore di media di una lampada alogena. Questa particolare durata nel tempo, unita ad un flusso di degrado lento e progressivo implica una sensibile diminuzione della manutenzione durante l'uso e una minor frequenza di sostituzione, 25 volte di meno rispetto alle lampade alogene.

La luce emessa dai diodi è una luce dallo spettro piccato. Per le realizzazioni civili, questo spettro viene composto e/o corretto con processi di miscelazione e fluorescenza.

Nel primo caso vengono miscelate tre luci primarie, tipicamente verde, rossa e blu, in modo che, dosando le singole potenze, si ottenga luce variamente colorata con il processo della sintesi additiva. Nel secondo caso, un diodo a emissione blu viene ricoperto con una calottina fluorescente, in modo che la luce emessa acquisti uno spettro variamente esteso.

Si sente spesso parlare della nocività dei raggi UV e IR e dell'assenza di emissione da parte dei LED.

Lo spettro luminoso dei LED può variare molto in funzione alla scelta del tipo di LED e del suo uso ma di per sé un LED produce una singola luce monocromatica. Quindi a differenza degli altri sistemi di illuminazione con uno spettro continuo in cui sono presenti contemporaneamente tante frequenze cromatiche che unendosi formano la luce che percepiamo, il LED ha una sola frequenza, di conseguenza un solo colore e quindi non emette né UV né IR.

Tutto ciò riduce al minimo il rischio di danneggiare gli oggetti illuminati, si risolve così un problema che da sempre interessa in modo particolare i manufatti irrealizzati in materiale più sensibile al deterioramento dovuto all'illuminazione, specie se concentrata.

La figura seguente mostra lo spettro delle emissioni LED.

Rispetto alle sorgenti tradizionali, i LED presentano vantaggi e svantaggi:

I vantaggi

- dimensione minima
- generazione di calore lieve
- Nessuna emissione di UV
- Facilità di installazione e manutenzione
- la luce può essere messa a fuoco in continuo

Gli svantaggi

- la necessità di utilizzare lenti per convogliare il flusso luminoso
- uno spettro carente soprattutto nelle bande estreme del visibile

L'uso di sommare più LED per sovrapporre lo spettro si scontra, d'altra parte, con la difficoltà di sovrapposizione del flusso e con la possibile produzione di zone diversamente colorate.

Malgrado questi limiti, tuttavia, l'uso di LED nell'illuminazione dei gioielli costituisce un'importante novità e,

soprattutto se impiegato congiuntamente a sorgenti tradizionali, può portare a risultati estremamente interessanti.

Illuminazione a fibra ottica

Illuminazione a fibre fibra ottica viene utilizzata come base per luce luci o piatte e l'illuminazione dell'oggetto e visualizzazione

I vantaggi

- Nessuna radiazione UV
- Nessuna generazione di calore
- Facile da mantenere

Come detto in precedenza, è importante considerare con cura i colori degli oggetti esposti e quelli delle superfici opache del contenitore stesso. Se la teca ha superfici opache scure, sugli oggetti si formeranno in genere ombre decise, e il grande contrasto di luminanza darà all'esposizione un tono altamente drammatico, in grado di enfatizzare piccoli oggetti. Di contro, una teca dalle superfici opache chiare aumenterà il campo luminoso diffuso, attenuerà le ombre e aiuterà a cogliere appieno il volume di grandi oggetti, come ad esempio coppe, scrigni, corone.

Poiché per la percezione è importante tanto il contrasto di luminanza quanto quello cromatico, l'uso di superfici di esposizione colorate va attentamente valutato: un velluto rosso può esaltare gemme con colore complementare al rosso, come lo smeraldo, e penalizzare invece pietre rosse come il rubino o con sfumature troppo prossime al rosso, come ad esempio la corniola o il topazio maderia. Anche per i metalli il colore delle superfici è un'arma a doppio taglio, perché una superficie di esposizione colorata può attenuare le loro differenze cromatiche.

L'illuminazione delle teche contenenti reperti, è un problema complesso, che richiede una particolare competenza illuminotecnica e cromatologica. I metalli ed i gioielli antichi, in particolare, provocano ulteriori difficoltà, sia per la delicatezza di materiali e lavorazioni.

Il colore dell'oro e/o delle leghe metalliche utilizzate è inoltre meno uniforme di quello della gioielleria moderna: il particolare giallo dell'oro zecchino ama luci più fredde di quelle, più simili alla luce della fiamma, che fanno risaltare l'oro rosso. I granati, le ametiste amano brillare dei toni di rosso scuro presenti solo nelle lampade a incandescenza, ma nel contempo zaffiri e lapislazzuli possono prendere vita solo da forti dosi di blu.

. In chiusa, dunque, non si può che augurarsi che l'esposizione e l'illuminazione dei gioielli antichi possa basarsi sempre più su tecniche, ricerche e competenze oggi troppo spesso svilite, ma in grado invece di garantire migliori condizioni di visione e di conservazione.

Bibliografia

G. Forcolini, *Illuminazione di interni: la luce, i colori, le grandezze fotometriche, le nuove sorgenti, il design dell'illuminazione e il progetto dell'impianto di illuminazione, il confort visivo e altri obiettivi del progetto illuminotecnica, le metodologie*, Milano 1988.

G. Forcolini, S. Forte, *Luce dinamica. Effetti di luce per vetrine, showroom, punti vendita, allestimenti*, Busto Arsizio (VA) 2003.

D. Ravizza, *Progettare con la luce*, Milano 2001.

Pietro Palladino, Manuale di illuminazione

Quadro normativo di riferimento:

Norma UNI 10829 "Condizioni ambientali di conservazione, misure ed analisi", luglio 1999.

Norma UNI 10380, "Illuminazione di interni con luce artificiale", maggio 1994.

Norma UNI 15898, "Conservazione dei beni culturali, principali termini e definizioni", luglio 2012.

Norma UNI EN 15999 “Conservazione dei beni culturali - Linee guida per la progettazione di vetrine per l'esposizione e la conservazione di oggetti” - Parte 1: Aspetti generali, gennaio 2014.

Norma UNI EN 16163, “Conservazione dei beni culturali - Linee guida per scegliere l'illuminazione adatta a esposizioni in ambienti interni. di vetrine per l'esposizione e la conservazione di oggetti” gennaio 2014.

La chimica nelle vetrine

Ilaria Bonaduce¹, Maria Perla Colombini^{1,2}, Paul Lancaster³, David Tickett³

¹Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale, via Moruzzi 13, 56126 Pisa

²Istituto per la Conservazione e Valorizzazione dei Beni Culturali del CNR, via Madonna del Piano 10, 50016 Sesto Fiorentino (Firenze)

³English Heritage, 1 Waterhouse Square, 138 Holborn, London

Introduzione

Nei musei, niente sembra di più sicuro che conservare quadri, libri e oggetti metallici in specifiche teche. In realtà esiste un nemico insidioso che minaccia lo stato di conservazione di tutti questi tesori: l'inquinamento atmosferico. Monitorare la qualità dell'ambiente è fondamentale non solo nelle sedi espositive, ma anche all'interno delle teche dove gli oggetti sono conservati, poiché proprio in questi microclimi si possono produrre concentrazioni di inquinanti anche estremamente elevate. Ciò implica che per proteggere un oggetto non basta sigillarlo all'interno di una cornice o di una teca microclimatica, ma che bisogna verificare i materiali con cui questi contenitori sono costruiti e monitorare la qualità dell'aria al loro interno.

L'ambiente museale può contenere una miscela complessa di sostanze inquinanti e, soprattutto, in edifici senza aria condizionata la temperatura, l'umidità e i livelli di inquinamento possono variare molto nel corso dell'anno: ciò, insieme alla complessità degli oggetti conservati, porta a processi di degrado non facilmente prevedibili.

Non esistono al momento valori di soglia specifici per gli effetti dell'inquinamento atmosferico sui beni di interesse storico-artistico, e i limiti di legge sull'inquinamento dell'aria in vigore nel nostro paese e in tutta l'Europa, definiti per la salvaguardia della salute umana, degli ecosistemi e della vegetazione, non assicurano una adeguata protezione anche per le opere d'arte a causa della diversità dei meccanismi chimico-fisici coinvolti.

In Italia, per le opere d'arte esposte all'interno dei musei, il Decreto Legislativo n. 112 del 1998 affronta, con l'art. 150, il problema della qualità dell'aria all'interno e le implicazioni dell'ambiente esterno sulle opere conservate. In particolare, le condizioni ambientali di conservazione negli edifici museali sono indicate dalla Norma UNI10829:1999 "Beni di interesse storico e artistico. Condizioni ambientali di conservazione. Misurazione ed analisi" e dal successivo Decreto Ministeriale 10 maggio 2001 "Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei" [Ministero per i beni e le attività culturali, D.M. 10.5.2001 Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei, ItalianMinisterDegree G.U. n. 238, 19.10.2001]. In Tabella 1 si riportano, a titolo di esempio, i valori di alcuni parametri ritenuti accettabili per la conservazione di materiali organici in sistemi museali. La prima norma descrive una metodologia per la misurazione in campo delle

grandezze termoigrometriche e di illuminazione con l'obiettivo di contenere i fenomeni di degrado. Il Decreto suggerisce criteri tecnico-scientifici indirizzati sia alla conoscenza che alla salvaguardia dei beni.

TABELLA 1 - Intervallo di accettabilità di temperatura (T) e umidità relativa (UR) per alcune categorie di beni secondo la norma UNI10829.

Materiali	T°C	ΔT°C MAX.	RH %	ΔRH% MAX
Carta, cartapesta...	18÷22	1.5	40÷55	6
Tessuti, fibre naturali...	19÷24	1.5	30÷50	6
Disegni su carta, acquerelli, pastelli...	19÷24	1.5	45÷60	2
Dipinti su tela, pitture a olio su tela e canovaccio, tempere, guazzi	19÷24	1.5	45÷60	6
Sculture policrome di legno, legno dipinto, pitture su legno, icone di legno, strumenti musicali di legno	19÷24	1.5	50÷60	4

Per quanto la conoscenza dei parametri termoigrometrici sia fondamentale per capire come il microclima possa agire sui vari materiali conservati, è comunque necessario valutare anche quale sia l'impatto di specifici inquinanti indoor sugli oggetti storico-artistici.

In questo capitolo, vengono descritti rischi e degrado in funzione della composizione dei manufatti di interesse storico artistico, dell'ambiente e dei più comuni inquinanti atmosferici indoor.

I principali meccanismi di degrado

Lo studio del degrado è complesso per le difficoltà nel separare gli effetti dei vari agenti di degrado poiché nessun fattore agisce singolarmente. L'effetto di ognuno viene potenzialmente influenzato dalla presenza concomitante degli altri; quindi l'esposizione ad un fattore potrebbe rendere il materiale maggiormente suscettibile alla successiva azione degli altri. L'effetto osservato è plausibilmente frutto di una sinergia di più fattori. In generale si possono elencare tre principali meccanismi secondo i quali i materiali subiscono modifiche:

1. **Degrado fisico.** I cambiamenti di temperatura e umidità relativa causano espansione e contrazione dei materiali. In ambiente confinato, i materiali inorganici composti, a causa della differente dilatazione dei metalli presenti in funzione della temperatura, possono dar luogo al distacco di frammenti. La maggior parte dei materiali organici sono igroscopici e in equilibrio con l'umidità relativa: espansione e contrazione possono causare deformazioni e fessurazioni. Gli oggetti in cera, a temperature superiori ai 30°C si ammorbidiscono e di conseguenza attirano molta polvere, rendendo necessarie pulizie aggressive; per temperature inferiori a 13°C, la cera d'api diventa fragile e si fessura¹. La carta non è particolarmente sensibile a questi fenomeni, a meno che non sia fissata. Il nitrato di cellulosa e le pellicole in acetato possono perdere i plastificanti nell'invecchiamento: ciò causa deformazioni e cracking. Un range di umidità relativa tra il 40 e il 65% non dovrebbe causare cambiamenti significativi alla maggior parte dei materiali

organici. Gli oggetti possono abituarsi al loro ambiente, come descritto in una norma europea che valuta le fluttuazioni storiche ^{2,3}.

Ad esempio, gli smalti sono molto sensibili al degrado fisico: l'argento ha un elevato coefficiente di espansione termica, mentre quello del vetro è vicino a zero. È stato visto che fluttuazioni termiche giornaliere superiori a 2°C generano micro-cracking all'interfaccia vetro metallo ⁴. Fluttuazioni di 8°C hanno generato perdite di scaglie di vetro. Fluttuazioni di umidità e temperatura possono influenzare i cicli di dissoluzione/cristallizzazione di sali (ad es. solfati) presenti in materiali porosi, come in qualche pietra e ceramica, provocando modificazioni strutturali degli oggetti.

2. Degrado chimico. Molti materiali interagiscono chimicamente con l'ambiente. Quando l'umidità relativa è elevata in presenza di inquinanti, i metalli subiscono una corrosione più rapida. I materiali organici, generalmente, subiscono reazioni di idrolisi acida e ossidazione con variazioni cromatiche evidenti e microfessurazioni. Tuttavia, nel caso della carta, non è chiaro se fluttuazioni di umidità relativa possano accelerarne la degradazione chimica. Alcuni materiali sono estremamente sensibili a livelli molto bassi di inquinamento, come ad esempio l'argento con il solfuro di idrogeno e la gomma con l'ozono. Molte reazioni richiedono la contemporanea presenza di un inquinante, ossigeno ed acqua. Valori elevati di umidità relativa aumentano la velocità di molte reazioni di degradazione chimica: per esempio, l'acetato di cellulosa produce una acidità tre volte superiore passando da valori di umidità relativa del 35% al 75% a 20 ° C. Il lattice di gomma esposto a 200 mg/m³ di ozono si ossida 160 volte più velocemente a umidità relativa del 91% rispetto al 50% ⁵. Il piombo si corrode 60 volte più velocemente quando esposto a 1000 mg/m³ di acido acetico al 75% di umidità relativa che non al 34% .

3. Degrado biologico. I materiali, prevalentemente quelli organici, costituiscono ottimi substrati per la crescita di muffe e di insetti parassiti. Assumendo sostanze dal substrato a scopo nutrizionale (molecole organiche, sali minerali), i microorganismi emettono cataboliti (ad esempio acidi organici quali ossalico, succinico, citrico, fumarico ecc. e molecole ad azione chelante) capaci di provocare la solubilizzazione dei materiali, rilasciano pigmenti fotosintetici (microorganismi autotrofi) e esopigmenti (funghi, batteri) che provocano alterazioni cromatiche. La presenza di biodeteriogeni determina alterazioni che si manifestano in modi molto diversi al punto che spesso un semplice riconoscimento visivo non risulta sufficiente all'individuazione delle cause biologiche dell'alterazione stessa.

Inquinanti atmosferici

Gli inquinanti (gassosi o adsorbiti sul particolato) presenti in ambiente museale possono essere classificati come segue:

1. Inquinanti outdoor provenienti dall'area urbana in cui il museo è posizionato. Ossidi di azoto, ossidi di zolfo, idrogeno solforato, solfuro di carbonile (COS), anidride carbonica e ozono sono

tipicamente i gas prodotti dalle emissioni industriali e domestiche e dal traffico veicolare: la loro azione degradativa verso i beni culturali è ben nota. Poiché questi inquinanti provengono principalmente dall'esterno, ridurre le loro concentrazioni in ambiente museale implica ridurre lo scambio di aria con l'esterno migliorando i sistemi di filtraggio dell'aria e sigillando sia gli edifici che le vetrine. Adeguati sistemi di filtraggio dell'aria bloccano anche il particolato di origine esterna, evitando un notevole rischio di degrado: infatti, in ambienti confinati, la deposizione delle particelle avviene per termoforesi ed elettroforesi sulle superfici con temperatura inferiore rispetto all'aria circostante. Il controllo e la manutenzione dei filtri dei termoconvettori, il controllo delle aperture delle finestre e delle porte di ingresso (ad es. inserimento di tendaggi) rappresentano dei modi semplici ma efficaci per ridurre l'inquinamento.

2. Inquinanti indoor provenienti dall'emissione di arredi museali, materiali di costruzione (tinte, sigillanti...), materiali per la pulizia, opere d'arte, turisti e personale del museo. Oltre agli inquinanti inorganici di origine esterna, all'interno si ha la presenza di acidi organici (acido formico, acido acetico), formaldeide, composti organici volatili (VOC) ed un aumento di CO₂ e polvere determinato dal flusso dei visitatori e dal personale del museo. Il legno e molti altri materiali da costruzione per vetrine e teche emettono acido acetico, formico e altri acidi volatili, ma se per alcuni di questi gas si conoscono gli effetti di deterioramento, per molti altri gli effetti non sono noti ⁶⁻⁸. Le condizioni di temperatura e umidità relativa costanti negli ambienti confinati, soprattutto nelle teche, rendono basso lo scambio di aria: ciò produce un aumento di inquinanti emessi dai materiali durante il loro invecchiamento naturale. In vetrine poco ventilate, la concentrazione di acidi organici e VOC è spesso più alta rispetto agli inquinanti inorganici creando un effetto di "green houses" e favorendo le crescite microbiologiche ^{9,10}. All'interno di cornici microclimatiche, concentrazioni elevate di acido acetico, acido formico, toluene, α -pinene, xilene e limonene possono provocare danni ai materiali pittorici. In particolare, α -pinene e limonene reagendo con agenti ossidanti, potrebbero produrre una emissione secondaria di VOC (acido formico e acetico, aldeidi e acidi grassi) ^{6,9}. All'interno delle cornici microclimatiche si verifica un'emissione dei componenti del dipinto (leganti e vernici): per invecchiamento, i leganti oleosi si ossidano e si idrolizzano producendo acidi grassi liberi che per quanto poco volatili si condensano sul vetro della cornice producendo l'effetto "ghost" ¹¹. Molti sono i materiali che emettono gas durante l'invecchiamento, ad esempio, nelle teche si conserva meglio un singolo foglio di carta che non una risma di carta che intrappola i gas generati. Pertanto sarebbe necessario che tutti i materiali utilizzati per la conservazione e la fruizione (vetrine, cornici, carte...) fossero controllati per escludere un loro potenziale contributo alla formazione di atmosfere corrosive e ossidative. La Tabella 2 riassume gli inquinanti potenzialmente emessi dai materiali utilizzati nei musei, e spesso usati per la costruzione di vetrine.

Tabella 2. Emissione di inquinanti da parte dei materiali. M: possibile emissione di inquinanti che in alcuni casi sono rilasciati dai materiali; questi materiali devono essere controllati prima del loro utilizzo.

Materiale	Inquinante organico	Inquinante ossidante	Solfuri
legno	si	M	M
prodotti lignei	si	M	M
pittura	M	M	M
adesivi	M	M	M
sigillanti	M	M	M
mobilio	M	M	M
gomme	M	?	si
vernici	M	M	M
plastiche	M	M	?
metalli	no	no	no
vetro	no	no	no

Di seguito si riassumono gli effetti chimici osservati per ciascun inquinante;

a) *Biossido di zolfo*. Esso reagisce con il vapor d'acqua nell'aria per generare acido solforico ed è stato l'inquinante più pericoloso del passato. Attualmente, grazie alle normative ambientali, la sua concentrazione si è drasticamente ridotta. Questo inquinante aumenta la velocità di idrolisi nella carta, nel pellame, nei tessuti e corrode i metalli. SO_2 gassoso sulla superficie di pellami trattati con tannini si ossida a SO_3 per idrolizzare ad acido solforico. Gli oggetti in pellame e i tessuti presentano depolimerizzazione e un elevato contenuto di solfati: in casi estremi, la superficie si polverizza. Gli oggetti in carbonato di calcio (conchiglie, statuette in marmo...) sono soggetti a formazione di solfato di calcio (gesso) soprattutto in presenza di elevati valori di umidità relativa. I materiali ligneo-cellulosici si infragiliscono, sbiadiscono e sono soggetti alla comparsa di macchie. In genere i materiali metallici tendono a corrodersi formando ossidi: i bronzi e gli oggetti in rame si ricoprono di una patina di colore verde-azzurro formata principalmente da brochantite $[CuSO_4 \cdot Cu(OH)_2]$.

b) *Biossido di azoto*. E' un agente ossidante e rappresenta il secondo maggior pericolo per l'ossidazione dei materiali organici. La maggior parte dei coloranti organici presenti nei dipinti e nei tessuti è particolarmente sensibile alla sua azione. La velocità di scolorimento aumenta rapidamente in funzione dell'illuminazione e dell'umidità relativa.

c) *Ozono*. E' l'inquinante con le più elevate caratteristiche ossidanti ma presente a bassa concentrazione; è estremamente reattivo verso i composti presenti sulle superfici esposte con conseguente possibile alterazione delle medesime. Produce effetti dannosi sui manufatti ed in particolare sui pigmenti utilizzati nei dipinti, sui coloranti organici, sui materiali tessili di vario genere. L'ozono reagisce con i doppi legami dei materiali organici e, ad esempio, è responsabile

della perdita delle proprietà elastiche delle gomme con infragilimento della superficie. Tale effetto è accelerato da un aumento dell'umidità relativa.

d) *Solfuro di idrogeno e solfuro di carbonile*. Questi inquinanti causano l'annerimento delle superfici di argento. La reazione iniziale è la formazione di ossido di argento causata dalla presenza di NO_2 e O_3 ; l'ossido di argento reagisce per formare il solfuro di colore nero. Spesso, nei musei, si osserva la formazione di miscele di solfuro, ossido e cloruro di argento con inclusione di materiale organico.

e) *Particolato*. Il particolato penetrato dall'esterno o prodotto da attività antropiche all'interno si deposita sulle superfici. L'umidità ambientale fa aderire fortemente il particolato agli oggetti: ciò induce ad utilizzare dei metodi di pulitura molto aggressivi che causano perdite di materiale. I materiali cartacei e tessili sono tra i più sensibili.

f) *Acido acetico, acido formico e formaldeide*. Tra gli inquinanti generati internamente, sono quelli che maggiormente causano reazioni di degrado, soprattutto all'interno di teche o vetrine. Il piombo è il materiale più suscettibile all'azione dell'acido acetico, ma reagiscono anche leghe di rame, smalti, conchiglie e ceramiche. Il piombo reagisce per formare un voluminoso strato di corrosione a base di carbonato di piombo. La reazione con acido acetico è molto sensibile all'umidità: la corrosione procede 60 volte più velocemente in presenza di 1000 mg/m^3 di acido acetico al 75% di umidità relativa rispetto al 34%. La carta è meno sensibile a questo effetto: ad esempio, una carta di stracci conservata a 23°C e 50% di umidità relativa mostrerà una riduzione della sua catena polimerica cellulosa del 50% in 657 anni; in presenza di 1 mg/m^3 di acido acetico questo processo richiederà 614 anni. L'effetto dell'acido formico non è ancora chiaro; al contrario, in seguito a test di invecchiamento accelerato sulla carta, i composti formaldeide, vanillina, furfurale, toluene, 1,4 dietilbenzene, isobutilbenzene, 2 pentilfuran e esano mostrano evidenti interazioni con il polimero della cellulosa. I materiali in acetato di cellulosa (pellicole cinematografiche, fotografie...) costituenti molti oggetti artistici moderni agiscono da sorgenti di inquinanti: rilasciano acido acetico in grande quantità. Il processo di degradazione è noto come "sindrome dell'aceto" accompagnato da comparsa di acidità, odore di aceto, depositi cristallini, bolle, sbiadimento dei colori e con restringimento e infragilimento degli oggetti. Molte tinte, sigillanti e lacche contengono acetato di etile e metile, reagendo con l'umidità dell'aria anche questi materiali generano acido acetico e causano reazioni di degrado. La formaldeide esplica il suo effetto sulla carta, su alcuni vetri che contengono rame e sui metalli soprattutto ad alti valori di umidità relativa o in sinergia con altri agenti ossidanti. Oltre all'emissione di questi componenti acidi si può avere anche l'emissione di gas quali stirene, ammoniaca e diverse specie clorurate che corrodono i metalli^{6,12}.

g) *crescita di muffe*. Temperatura ed umidità favoriscono l'attacco microbiologico. Le muffe attaccano rapidamente le collezioni e, ad esempio, la lana mostra perdita di materiale in tempi estremamente brevi^{13,14}. Il controllo delle condizioni microclimatiche può prevenire l'attacco.

Tabella 3. Inquinanti, fonti indoor principali, materiali sensibili (adattata da ⁶ con integrazioni).

Inquinante	Principale sorgente indoor		Materiali sensibili	Bibliografia
Specie che contengono zolfo ridotto (H ₂ S, COS...)	Lana	Tessuti, p.es feltro	Argento, bronzo e rame coloranti/materiali fotografici	6,12,13,15
	Gomma	Adesivi		
	Sigillanti	A base di polisolfuri		
	Oggetti	Contenenti gomma e pirite		
SO ₂	Oggetti	Contenenti fibre proteiche, minerali con pirite	Carta, rame, pellami, alcuni coloranti	6
Acidi organici (CHOOH, CH ₃ COOH...)	Legnami	Tutti, soprattutto la quercia	Piombo, rame, zinco, cadmio, magnesio, ceramica, conchiglie corallo, rocce carbonatiche, fossili, vetro basico carta ferro archeologico	12 6,16,17
	Legnami compositi	MDF, compensato, truciolato		
	Pittura	Ad olio, molte emulsioni, acrilici e nitrocellulosa		
	Adesivi	Polivinilacetato, alcuni poliuretani		
	Vernici/resine			
	Sigillanti	Alcuni siliconi		
	Oggetti	Acetato di cellulosa		
	Linoleum			
	Muffe			
Visitatori				
Formaldeide	Adesivi	Urea e fenolformaldeide	Alte concentrazioni attaccano sia materiali organici che inorganici	12
	Legnami	Tutti		
	Legnami compositi	MDFcompensato, truciolato		
	Tessuti, pitture			
Cloruri	Plastiche	PVC, PVDC	Rame, alluminio, zinco, ferro	12
	Ritardanti di fiamma	Sali inorganici		
Ossidi di azoto	Plastiche	Nitrato di cellulosa	Rame e ferro tessili e film pelle e carta	12,15,16
Ozono	Fotocopiatrici/stampanti		Coloranti, pigmenti, gomme	6
Ammine, ammoniaca	Sigillanti	Silicone di tipo alcalino	Corrosione di metalli, efflorescenze su nitrato di cellulosa	6
	Cemento			
	Adesivi	Emulsioni		
	Pitture	Emulsioni		
	prodotti per la pulizia			
Perossidi	Dipinti	A base di olio	Scolorimento di stampe, degrado di alcuni coloranti	
	Materiali organici	p.es gomme		

Il danno ai materiali

Il principio fondamentale della conservazione preventiva è di prevenire il danno^{18,19}. Definire le priorità del rischio di danno per ciascun materiale in funzione di ciascun parametro ambientale e di inquinamento, aiuterebbe nel prevenire i danni agli oggetti da conservare e ridurrebbe i rischi maggiori. A tale scopo in tabella 4 vengono riassunti in base alla priorità di rischio, i parametri ambientali e gli inquinanti che maggiormente influiscono sulla conservazione degli oggetti da conservare^{15,20-64}.

Tabella 4. Priorità dei parametri ambientali che causano danni ai materiali (valori di umidità relativa tra il 60 e l'80 % sono considerati alti)

MATERIALI	Estrema sensibilità	Elevata sensibilità	Sensibilità
Metalli			
Piombo	Inquinanti organici		Solfuri
Argento	Solfuri		Inquinanti organici
Rame		Solfuri	Inquinanti organici, inquinanti ossidanti, alta umidità relativa
Rame archeologico		Alta umidità relativa > solfuri	Inquinanti organici, inquinanti ossidanti
Ferro		Alta umidità relativa	Inquinanti organici > inquinanti ossidanti, solfuri
Ferro archeologico	Alta umidità relativa		Inquinanti organici > inquinanti ossidanti, solfuri
Cadmio		Inquinanti organici	Alta umidità relativa
Zinco		Inquinanti organici	Inquinanti ossidanti, solfuri, alta umidità relativa
Stagno			Alta umidità relativa
Peltro		Inquinanti organici	Inquinanti ossidanti, solfuri, alta umidità relativa
LEGNO			
Arredi		Umidità relativa fluttuante	Solfuri
Strumenti musicali	Solfuri		Inquinanti organici
Marketry/Inlay		Luce > umidità relativa elevata o fluttuante	Inquinanti ossidanti
Lacche		Luce	Inquinanti ossidanti, umidità

			relativa alta o fluttuante
Dorature		Umidità relativa fluttuante > alta	Inquinanti ossidanti
CARTA			
Carta stracci		Inquinanti ossidanti, inquinanti organici	Luce, umidità relativa alta o fluttuante
Carta industriale	Inquinanti ossidanti, luce	Inquinanti organici, umidità relativa alta o fluttuante	
Carta libera da lignina		Inquinanti ossidanti, inquinanti organici, luce, umidità relativa alta o fluttuante	
PELLE			
Pelle conciata	Inquinanti ossidanti	Luce > umidità relativa fluttuante	Alta umidità relativa > inquinanti organici
Pelle conciata idrolizzata		Inquinanti ossidanti > umidità relativa fluttuante	Alta umidità relativa > Luce, Inquinanti ossidanti
Pergamena	Umidità relativa fluttuante	Alta umidità relativa > inquinanti organici	Inquinanti ossidanti
VERNICI			
Naturali		Luce	Inquinanti ossidanti, inquinanti organici
Sintetiche			Luce, Inquinanti ossidanti, inquinanti organici
TESSILI			
Lana			Inquinanti ossidanti > inquinanti organici, luce, alta umidità relativa
Seta			Inquinanti ossidanti > inquinanti organici, alta umidità relativa > luce
Cotone			Umidità relativa alta o fluttuante, inquinanti ossidanti, acidi organici
Lino			Umidità relativa alta o fluttuante, inquinanti ossidanti,

			acidi organici
Cellulosa			Umidità relativa alta o fluttuante, inquinanti ossidanti, acidi organici
Sintetici			Alta umidità relativa
DIPINTI			
Tela			Inquinanti ossidanti > inquinanti organici, umidità relativa alta o fluttuante
Tavola lignea		Umidità relativa fluttuante	Alta umidità relativa > inquinanti ossidanti
Rame		Solfuri	Inquinanti organici ≈ inquinanti ossidanti, alta umidità relativa
OGGETTI DI STORIA NATURALE			
		Luce > alta umidità relativa	Inquinanti ossidanti, umidità relativa fluttuante
OGGETTI CALCAREI			
		Inquinanti organici, umidità relativa fluttuante	Inquinanti ossidanti
PLASTICHE			
		Inquinanti ossidanti	Luce, umidità relativa alta o fluttuante
VETRO			
			Inquinanti organici, Inquinanti ossidanti, umidità relativa alta o fluttuante
CERAMICHE			
		Umidità relativa fluttuante	Inquinanti organici
PIETRA			
		Umidità relativa fluttuante	Inquinanti organici, Inquinanti ossidanti, alta umidità relativa
PIETRA POLICROMA			
		Umidità relativa fluttuante	Luce > Inquinanti organici,

			Inquinanti ossidanti, alta umidità relativa
OSSA			
			Inquinanti organici, luce, umidità relativa alta o fluttuante
AVORIO			
		Umidità relativa fluttuante	Luce, alta umidità relativa
AMBRA			
		Luce	Inquinanti organici, umidità relativa alta o fluttuante

In generale è noto che una elevata umidità relativa sia in grado di accelerare certe reazioni chimiche, tra cui quelle che causano direttamente danno all'oggetto e quelle che portano all'emissione di inquinanti. I metalli, quando sono freddi, possono essere danneggiati in superficie da fenomeni di condensazione e reazioni in fase acquosa. I materiali organici naturali in presenza di una elevata umidità relativa possono rigonfiare, e questo comporta una pressione fisica sulla struttura dell'oggetto e la generazione di stress tra materiali diversi. Questo è, ad esempio, il caso dei manufatti lignei, i quali in presenza di fluttuazioni dell'umidità relativa sono soggetti a stress strutturali e distacchi di materiali con risposta termoigrometrica diversa, come le giunture, le pellicole pittoriche ecc. In presenza di acqua si può osservare l'idrolisi di alcuni materiali organici, catalizzata dalla copresenza di specie inorganiche, come nel caso delle pellicole pittoriche. D'altro canto una bassa umidità relativa può causare altre tipologie di danno: i materiali organici, ad esempio, possono diventare fragili quando privati del potere plastificante delle molecole d'acqua in essi contenuti.

Altro fattore di rischio molto significativo è la luce in combinazione con l'ossigeno. Reazioni di ossidazione, che possono essere solitamente catalizzate da temperature elevate, sono alla base delle reazioni di degrado di tutte le sostanze organiche, sia sintetiche che naturali, e possono danneggiare anche materiali inorganici come pigmenti, metalli, leghe, fossili, ecc. Gli inquinanti inorganici, come ad esempio l'ozono e gli ossidi di azoto, hanno proprietà ossidanti e sono in grado quindi di spingere verso la formazione di specie ossidate^{36,55,65-75}. Gli acidi volatili, come l'acido solfidrico, l'acido acetico e quello formico, possono essere pericolosi per le loro proprietà acide, come nel caso del degrado dei metalli come piombo (Figura 1), rame (Figura 2) e argento, del vetro (Figura 3, Figura 4), della ceramica o dei fossili⁷⁶. Inoltre, sembra che l'acido acetico abbia un potere pro-ossidativo, ossia che, diminuendo l'energia necessaria per la decomposizione dei perossidi, sia in grado di catalizzare le reazioni di ossidazione dei materiali che sono soggetti a meccanismi di degrado auto-ossidativi, come gli oli siccativi o le vernici terpeniche⁵⁵.



Figura 1. Corrosione della lega piombo stagno usata per la saldatura di un gioiello

Comento: Prof questo articolo non so di chi è. Se non risponde david bisogna levarlo.



Figura 2. Corrosione di oggetti archeologici in rame di origine egizia⁷⁷.



Figura 3 Vetro che piange. Vaso del 18th century Facon de Venice, sulla cui superficie si osserva la formazione di formiati di sodio, prodotti dalla reazione dell'acido formico emesso dal compensato della scaffalatura della vetrina di esposizione.

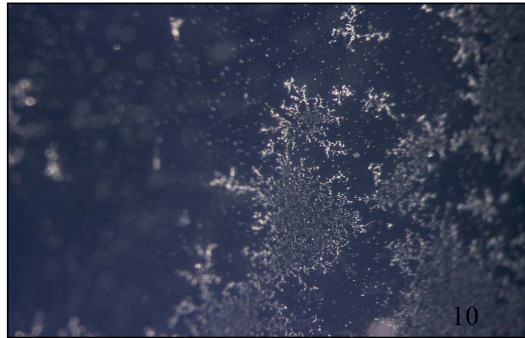


Figura 4 Vetro che piange. Vetro e smalto, sulla cui superficie si osserva la formazione di formiati di sodio, prodotto dalla reazione dell'acido formico emesso dal compensato della scaffalatura della vetrina di esposizione

La comprensione dettagliata dei fenomeni di degrado che avvengono negli ambienti museali in generale, e in particolare nelle vetrine e nelle cornici microclimatiche, è ben lontana dall'essere stata acquisita dalla comunità scientifica, perché troppo spesso non è possibile conoscere le condizioni ambientali nel loro complesso, sia per quello che riguarda i parametri fisici, come temperatura e livello di irraggiamento, sia per quello che riguarda la qualità dell'aria.

Controllo della qualità dell'aria

Al fine di affrontare i problemi legati sia all'inquinamento, outdoor e indoor, che all'umidità relativa in ambiente espositivo e di conservazione, andrebbero adottati metodi di mitigazione. La scelta delle modalità di mitigazione deve basarsi sulla tipologia dell'ambiente espositivo o di conservazione (come ad esempio una stanza, un magazzino, vetrine da esposizione, casse di trasporto o stoccaggio, armadi, cassette, vetrine e cornici microclimatiche, etc), e richiede la conoscenza della qualità dell'aria.

Misurazione della qualità dell'aria

Esistono numerosi metodi per la misurazione della qualità dell'aria in relazione alla presenza di inquinanti⁵¹. Questi possono essere divisi in due categorie: quelli che misurano direttamente la concentrazione degli inquinanti e quelli indiretti che evidenziano la presenza di uno o più inquinanti tramite la misura degli effetti indotti.

Metodi diretti

I metodi diretti richiedono un campionamento degli analiti su di una fase stazionaria opportuna, che varia da analita ad analita o che può essere efficace per una classe di molecole. Il campionamento può essere effettuato in maniera attiva o passiva, e la scelta va orientata sulla base della tecnica analitica che ci si propone di impiegare per la rilevazione e la quantificazione degli analiti e dei relativi intervalli di concentrazione da indagare. Nel caso del campionamento attivo si impiega una pompa per far circolare attivamente l'aria attraverso una cartuccia o un tubo riempiti di una opportuna fase stazionaria. Il tempo di campionamento è relativamente breve (tipicamente dell'ordine di qualche ora) e dipende dalla concentrazione degli analiti da indagare. Il metodo è utile nel caso si cerchino analiti presenti in basse quantità, poiché assicura limiti di rivelazione (LOD) piuttosto bassi. I risultati forniscono una misurazione puntuale della concentrazione dell'analita al tempo del campionamento.

Nel caso del campionamento passivo, si lascia che gli analiti volatili diffondano spontaneamente nella fase stazionaria imprigionata in un supporto⁷⁸, che può essere nella forma di tubi diffusivi, cartucce o "badge"⁷⁹. I supporti sono relativamente poco costosi e vengono esposti per un periodo che va da pochi giorni a pochi mesi, e che dipende dalla fase stazionaria e dagli analiti in questione. I risultati forniscono una concentrazione media dell'analita nel periodo di tempo indagato. L'accumulo degli analiti nella fase stazionaria non dipende solo dalla temperatura di esercizio e dal coefficiente di diffusione dell'analita nella fase stazionaria, ma anche dalla velocità di flusso dell'aria. Se questa è troppo bassa, gli analiti non vengono efficacemente rimpiazzati all'interfaccia con la fase stazionaria, e le concentrazioni risultanti sono una sottostima delle concentrazioni reali¹¹. Questa condizione si può verificare in ambienti con aria piuttosto statica, come ad esempio all'interno di vetrine, nelle quali il campionamento attivo potrebbe rappresentare una soluzione più affidabile.

In alternativa ai metodi sopra descritti, esistono delle metodiche di monitoraggio che campionano attivamente e in continuo l'aria; queste si basano sull'impiego di diverse tecniche analitiche, le quali variano da analita a analita o che sono valide per una intera classe di analiti. Le tecniche

impiegate presentano generalmente una buona sensibilità e accuratezza ed i risultati forniti sono le concentrazioni puntuali e in continuo dei vari analiti.

Metodi indiretti

I metodi indiretti in generale si basano su una relazione esposizione-effetto, e non sono quindi in grado di quantificare e specificare gli analiti presenti nell'aria indagata.

Tra i metodi indiretti più comuni troviamo quelli che impiegano delle strisce metalliche (ISO 9223⁸⁰, e ISO 11844-1⁸¹ e ISO 11844-2⁸²), le quali, esposte ad un particolare ambiente, si degradano. Sono numerose e possono essere scelte o per rappresentare l'oggetto in esame, o per la loro reattività a specifici inquinanti (argento, reattivo nei confronti di solfuri e cloruri; piombo, sensibile agli acidi organici; rame, sensibile a solfuri, cloruri e ossidi)⁸³. In questo caso le strisce vengono esposte per un periodo di tempo piuttosto lungo, almeno quattro settimane, al termine del quale le strisce vengono ispezionate visualmente, sebbene esistano altri metodi per analizzare i prodotti di degrado⁴. I risultati sono indicativi di come gli effetti delle condizioni ambientali si sono accumulati nel periodo di integrazione.

Le AD strips sono delle strisce di carta sulle quali è stato depositato un indicatore di pH (il verde di bromocresolo), il quale assume una colorazione diversa a seconda della concentrazione di sostanze acide. Vengono normalmente esposte per un paio di giorni e la lettura, visuale o colorimetrica, per una maggiore accuratezza, va fatta immediatamente, poiché la risposta è reversibile. Il metodo consente una indicazione rapida di una condizione di potenziale rischio e il grande vantaggio di queste strisce consiste nella loro economicità e praticità.

Più evoluto e con una risposta più elaborata, è il dosimetro MEMORI⁸. Il dispositivo si avvale dell'impiego di due vetri sensibili a temperatura, umidità e luce UV, uno dei quali reagisce con i gas ossidanti tipici dell'inquinamento outdoor, e l'altro sensibile agli acidi organici, tipici dell'inquinamento indoor. Per una corretta valutazione della qualità dell'aria i dosimetri vanno esposti per almeno 3 mesi; la risposta, rilevata con un lettore portatile al termine dell'esposizione, viene fornita differenziata per materiale, con riferimento ai valori di rischio riportati in letteratura.

Sono infine disponibili anche dei lettori in tempo reale, come ad esempio AirCorre OnGuard. Il primo sfrutta il principio della variazione della resistenza elettrica di un sensore metallico il quale viene corrosivo dall'atmosfera a cui è esposto. L'altro sfrutta una microbilancia a cristallo di quarzo sul quale viene depositato un metallo. Questo si corrode quando esposto, e cambia conseguentemente il suo peso. La bilancia risuona a una frequenza precisa, la quale cambia al variare del peso del metallo, che, a sua volta, cambia quando si corrode per effetto dell'esposizione.

Mitigazione

Se si è verificato un danno all'oggetto, o si pensa che questo possa accadere a breve, la prima azione da compiere è sempre quella di rimuovere l'oggetto dall'ambiente in cui è conservato e

trasferirlo in un posto con un ambiente più idoneo. Nel frattempo si cerca di rettificare il problema tramite l'attuazione di strategie di mitigazione. In particolare bisognerebbe rimuovere gli inquinanti, rimuovendo o bloccando quando possibile la sorgente che li emette. Tornando al concetto di mitigazione, quando non è possibile rimuovere o bloccare la sorgente che li emette, si può diminuire la concentrazione degli inquinanti tramite l'impiego di mezzi sorbenti o modificando i flussi d'aria nell'ambiente di conservazione.

La migliore strategia di mitigazione, sebbene non sempre applicabile, è quella di evitare l'uso di materiali che emettono elevate quantità di inquinanti. Questo si può fare sia rimuovendo i materiali emissivi, o selezionando in primo luogo dei materiali che emettono basse quantità di inquinanti. Il problema principale è legato al fatto che tutti i materiali organici (legno, tessuti, ecc.) emettono specie volatili, in maggiore o minore quantità, e che questi spesso fanno parte degli interni di edifici storici o dell'oggetto stesso (come ad esempio alcune cornici di quadri) e non possono pertanto essere eliminati⁸⁴⁻⁸⁶. Quando non è possibile rimuoverli, in alcuni casi è possibile bloccare le emissioni coprendo i materiali emissivi con delle barriere, come ad esempio delle pellicole in alluminio⁸⁷. Questa strategia è piuttosto semplice, economica e decisamente fattibile, ad esempio, per quelle parti della vetrina che non sono in vista.

Sebbene per alcuni materiali che costituiscono una vetrina o cornice microclimatica, come il legno, la natura delle specie emesse è riportata in letteratura, per molti altri materiali si può generare la necessità di investigare quali siano le specie da loro emesse. In questo contesto si inserisce il test Oddy¹² il quale viene impiegato per verificare se i materiali che costituiscono una vetrina emettono degli inquinanti in grado di danneggiare tre tipi di metalli (piombo, rame e argento), e, per estensione, gli altri materiali che mostrano una simile sensibilità agli inquinanti. In questo test tre strisce metalliche, la cui superficie è stata preventivamente abrasa per aumentarne la superficie reattiva, vengono esposte ai vapori emessi da 2g del materiale da investigare per 28 giorni, in presenza di 2 ml di acqua, a 60°C, in un ambiente chiuso e di dimensioni ridotte (come quelle di una provetta). Al termine dell'esposizione, i materiali vengono analizzati visivamente. Recentemente è stato proposto un test Oddy anche per i materiali cellulosici⁷.

Nei casi in cui non sia possibile rimuovere le sorgenti di sostanze inquinanti, bisogna ragionare se è possibile intervenire sulla velocità con cui l'aria viene scambiata con l'esterno. Nel caso di sistemi chiusi all'interno dei quali viene confinata l'opera d'arte, come ad esempio vetrine o cornici microclimatiche, un fattore su cui si può agire se al loro interno si accumula una elevata concentrazione di sostanze inquinanti, è l'areazione. Infatti quando il sistema è chiuso in maniera relativamente ermetica, gli inquinanti emessi rimangono intrappolati all'interno⁸⁸. Un possibile metodo di mitigazione in questo caso sarebbe quello di agire sul grado di scambio dell'aria con l'esterno (air exchange rate; AER), a patto che la qualità dell'aria esterna sia accettabile⁸⁹. Un sistema con un basso AER consentirà infatti l'accumulo degli inquinanti generati internamente, ma impedirà l'ingresso di inquinanti generati esternamente. Al contrario un sistema con un alto AER consentirà la dispersione degli inquinanti generati internamente per diluizione con l'aria in ingresso dall'esterno, ma provvederà una minore protezione dalla polvere, dagli inquinanti generati esternamente o dalle fluttuazioni di umidità dell'edificio o della stanza in cui l'oggetto si

trova⁹⁰. La misurazione della AER è relativamente semplice e si basa sull'impiego di un gas tracciante (DIN ISO 16000-8⁹¹), il quale viene iniettato nella vetrina, e in seguito si monitora la velocità con cui la sua concentrazione diminuisce nel tempo. La scelta tra sistemi con alta o bassa AER va basata quindi sulla qualità dei materiali presenti, la natura dell'oggetto esposto, e naturalmente le condizioni ambientali esterne. Quando si decide di aumentare l'AER del sistema in cui l'oggetto è confinato al fine di diluire gli inquinanti presenti al suo interno, lo si può fare sia aprendolo, o realizzando dei fori nella sua struttura, o impiegando delle pompe o delle ventole per aumentare forzatamente la circolazione dell'aria. In questo caso è possibile impiegare dei filtri in grado di migliorare la qualità dell'aria in ingresso.

Un'altra possibile via di mitigazione è quella che impiega sostanze adsorbenti, le quali possono essere inserite direttamente nelle vetrine^{92,93}. Nel corso del progetto europeo MEMORI è stato provato che il miglior mezzo adsorbente per gli inquinanti è il carbone attivo⁹⁴. Si tratta di un sistema semplice e relativamente poco costoso da impiegare per mitigare la qualità dell'aria all'interno delle vetrine, ma il suo posizionamento richiede una serie importante di considerazioni, tra cui l'impatto visivo che questo potrebbe avere, la necessità di sostituirlo quando non è più efficace, e il suo posizionamento, al fine di minimizzare l'impatto delle aumentate concentrazioni locali sul degrado dell'oggetto. Nel caso in cui si voglia controllare l'umidità relativa si possono impiegare gel di silice, o altri materiali come le zeoliti. Mentre i primi sono in grado di tamponare l'umidità intorno a valori specifici, i secondi assorbono semplicemente l'umidità ma non sono in grado di regolarla. Entrambi possono essere rigenerati per riscaldamento.

Infine è possibile filtrare l'aria in ingresso nella vetrina, o filtrare l'aria che viene fatta ricircolare all'interno della vetrina, tramite l'impiego di pompe e filtri specifici per la polvere e gli inquinanti. È possibile regolare l'umidità relativa impiegando anche dei deumidificatori o dei sistemi di controllo dell'umidità. Questi hanno dei costi iniziali relativamente elevati, ma a lungo termine sono più economici dei gel di silice che vanno periodicamente sostituiti.

Infine esistono dei casi particolari in cui si ritiene necessario rimuovere l'ossigeno dalla cornice microclimatica, al fine di bloccare le reazioni di ossidazione. In questi casi si possono costruire delle cornici anossiche in cui l'ossigeno viene eliminato in maniera passiva o attiva^{95,96}. Nel primo caso nelle cornici viene fatto fluire azoto prima della chiusura dell'oggetto, o l'ossigeno viene eliminato facendo il vuoto; le cornici devono avere una tenuta in grado di assicurare che l'ossigeno non penetri successivamente (ci si aspetta garantiscano una tenuta di almeno 10 anni). Nel secondo caso si fa fluire continuamente un gas inerte all'interno della cornice⁹⁷. Si tratta di sistemi piuttosto costosi che devono essere impiegati solo in casi di reale necessità e solo nei casi in cui si è certi che l'oggetto conservato non possa essere danneggiato dalle condizioni di anossia^{98,99}. Ad esempio è noto che il blu di Prussia è più stabile in un ambiente che contiene dal 5% al 21% di ossigeno piuttosto che in assenza di ossigeno, pertanto le cornici anossiche non devono essere impiegate per la conservazione di acquerelli che contengono questo pigmento.

Riferimenti

- (1) Purewal, V.: An investigation into the composition of botanical wax models with a view to their conservation. In *Resins ancient and modern: pre-prints of the SSCR's 2nd resins conference*; Wright, M. a. T., J., , Ed.: Aberdeen, 1995; pp 42-46.
- (2) Bratasz, L.: Allowable microclimate variations for painted wood. *Studies in Conservation***2013**, *58*, 65-79.
- (3) Conservation of cultural property – specifications for temperature and relative humidity to limit climate induced mechanical damage in organic hygroscopic materials. European committee for standardisation: Brussels, 2010; Vol. EN 15757:2010.
- (4) Thickett, D.; Chisholm, R.; Lankester, P.: Reactivity monitoring of atmospheres. In *Metals 2013*: Edinburgh, 2013; pp 129-136.
- (5) Ryan, P. B.; Koutrakis, P.; Bamford, S.: Ozone reactive chemistry in indoor microenvironments. In *Tropospheric Ozone and the Environment, Air and Waste Management Association*: Pittsburgh, 1992.
- (6) Tetreault, J.: *Airborne pollutants in museums galleries, and archives: Risk assessment, control strategies, and preservation management*; Minister of Public Works and Government Services: Ottawa, Canada, 2003.
- (7) Strlic, M.; Kralj Cigic, I.; Mozir, A.; Thickett, D.; de Bruin, G.; Kolar, J.; Cassar, M.: Test for compatibility with organic heritage materials - a proposed procedure. *e - preservation science***2010**, *7*, 78-86.
- (8) López-Aparicio, S.; Grøntoft, T.; Odlyha, M.; Dahlin, E.; Mottner, P.; Thickett, D.; Rhyl-Svendsen, M.; Schmidbauer, N.; Scharff, M.: Measurement of organic and inorganic pollutants in microclimate frames for paintings. *e-Preservation science***2010**, *7*, 59-70.
- (9) Camuffo, D.; Sturaro, G.; A., V.: Showcases: a really effective mean for protecting artworks. *Thermochimica Acta***2000**, *365*, 65-77.
- (10) Odlyha, M.; van der Brink, J. J. B.; Bacci, M.: Project EV5VCT94-0548 ERA: environmental research for art conservation. *Eur. Cult. Heritage Newslett. Res.***1997**, *10*, 67-77.
- (11) Schieweck, A.: Airborne pollutants in museum showcases. Material emissions, influences, impact on artworks. 2009.
- (12) Thickett, D.; Lee, L. R.: The Selection of materials for the storage or display of museum objects. *The British Museum Occasional Paper***2004**, *111*.
- (13) Brimblecombe, P.; Lankester, P.: Long-term changes in climate and insect damage in historic houses. *Studies in Conservation***2013**, *58*, 13-22.
- (14) Stengaard Hansen, L.; Akerlund, M.; Grøntoft, T.; Rhyl-Svendsen, M.; Schmidt, A. L.; Bergh, J.-E.; Vagn Jensen, K.-M.: Future pest status of an insect pest in museums, *Attegenus smirnovi*: distribution and food consumption in relation to climate change. *Journal of Cultural Heritage***2012**, *13*, 22-27.
- (15) Brimblecombe, P. " Pollution studies," 1997.
- (16) Menart, E.; De Bruin, G.; Strlic, M.: Dose-response functions for historic paper. *Polymer degradation and stability***2011**, *96*, 2029-2039.
- (17) Tetreault, J.; Cano, E.; van Bommel, M.; Scott, D.; Dennis, M.; Barthés-Labrousse, M.-G.; Minel, L.; Robbiola, L.: Corrosion of Copper and Lead by Formaldehyde, Formic and Acetic Acid Vapours. *Studies in Conservation***2003**, *47* 247-250.
- (18) Bradley, S.: Preventive conservation research and practice at the British Museum. *Journal of the American institute of conservation***2005**, *44*, 159-173.
- (19) Thickett, D.: Post Excavation Changes and Preventive Conservation of Archaeological Iron. Birkbeck College, University of London, 2012.
- (20) Chen, Z.; Liang, D., MA, G., ; Frankel, G.; Allen, H.; Kelly, R.: Influence of UV irradiation and ozone on atmospheric corrosion of bare silver. *Corrosion Engineering, Science and Technology***2010**, *45*, 169-180.
- (21) Clarke, S. G.; Longhurst, E. E.: The corrosion of metals by acid vapours from wood. *Journal of applied chemistry***1961**, *11*, 435-443.

- (22) Costa, V.: The deterioration of silver alloys and some aspects of their conservation. *Reviews in conservation***2001**, 2, 18-34.
- (23) Donovan, P. D.; Stringer, J.: Corrosion of metals and their protection in atmospheres containing organic acid vapours. *British corrosion journal***1971**, 6, 132-138.
- (24) Eriksson, P.; Johansson, L.; Strandberg, H.: Initial stages of copper corrosion in humid air containing SO₂ and NO₂. *Journal of the electrochemical society***1993**, 140, 53-59.
- (25) Storage of metals. Canadian conservation institute (CCI): Ottawa, Canada, 2007; Vol. CCI Notes 9/2.
- (26) Farrow, L.; Graedel, T.; Leygraf, C.: GILDES model studies of aqueous chemistry. II. The corrosion of zinc in gaseous exposure chambers. *Corrosion Science***1996**, 38, 2181-2199.
- (27) Feliu, S.; Mariaca, L.; Simancas, J.; Gonzalez, J.; Morcillo, M.: X-Ray photoelectron spectroscopy study of the effect of nitrogen dioxide and sulfur dioxide on the atmospheric corrosion of copper at low relative humidity value. *Corrosion Engineering, Science and Technology***2005**, 61, 627-638.
- (28) Gil, H.; Leygraf, C.: quantitative in situ analysis of initial atmospheric corrosion of copper induced by acetic acid. *Journal of the electrochemical society***2007**, 154, 272-278.
- (29) Gil, H.; Leygraf, C.; Tidblad, J.: GILDES model simulations of the atmospheric corrosion of zinc induced by low concentrations of carboxylic acids. *Journal of the electrochemical society***2012**, 159, 123-128.
- (30) Graedel, T.: Corrosion mechanisms for silver exposed to the atmosphere. *Journal electrochemical society***1992**, 139, 1963-1970.
- (31) Kim, H.; J., P.: Tarnish process of silver in 100ppb H₂S containing environments. *Journal of corrosion science and engineering***1999**, 1, 1-18.
- (32) Liang, D.; Allen, H.; Frankel, G.; Chen, Z.; Kelly, R.; Wu, Y.; Wyslouziil, B.: Effects of sodium chloride particles, ozone, UV, and relative humidity on atmospheric corrosion of silver. *Journal of the electrochemical society***2010**, 157, C146-C156.
- (33) Mariaca, L.; de la Fuente, D.; Feliu Jr., S.; Simancas, J.; Gonzalez, J.; Morcillo, M.: Interaction of copper and NO₂: effect of joint presence of SO₂, relative humidity and temperature. *Journal of Physics and Chemistry of Solids***2008**, 69, 895-904.
- (34) Martina, I.; Wiesinger, R.; Jembrih-Simburger, D.; Schreiner, M.: Micro-Raman characterisation of silver corrosion products: instrumental set up and reference database. *e-preservation science***2012**, 9, 1-8.
- (35) Oertel, C.; Baker, S.; Niklasson, A.; Johansson, L.; Svensson, J.: Acetic acid vapor corrosion of lead-tin alloys containing 3.4 and 15% Tin. *Journal of the electrochemical society***2009**, 156, 414-421.
- (36) S., O.: The effect of SO₂, NO₂ and O₃ on the corrosion of unalloyed carbon steel and weathering steel - the results of laboratory exposures. *Corrosion Science***1996**, 38, 1357-1368.
- (37) Qiu, P.; Leygraf, C.: Multi-Analysis of initial atmospheric corrosion of Brass induced by Carboxylic acids. *Journal of the electrochemical society***2011**, 158, 172-177.
- (38) Qiu, P.; Persson, D.; Leygraf, C.: Initial atmospheric corrosion of zinc induced by carboxylic acids: a quantitative in situ study. *Journal of the electrochemical society***2009**, 156, 441-447.
- (39) Raychaudhuri, M. R.; Brimblecombe, P.: formaldehyde oxidation and lead corrosion. *Stud. Conserv.***2000**, 226-232.
- (40) Rice, D.; Peterson, P.; Rigby, E.; Phipps., P.; Cappell, R.; Tremoureux, R.: Atmospheric corrosion of copper and silver. *Journal of the electrochemical society***1981**, 128, 275-284.
- (41) Tétreault, J.; Sirois, T.; Stamatopoulou, E.: Studies of lead corrosion in acetic acid environments. *Studies in Conservation***1998**, 43 17-32.
- (42) Thickett, D. "Relative effects of formaldehyde, formic and acetic acids on lead, copper and silver," The British Museum, 1997.
- (43) Thickett, D.; Bradley, S.; Lee, L. R.: Assessment of the risks to metal artifacts posed by volatile carbonyl pollutants. In *Metal 98*; Mourey, W., Robbiola, L., Eds.; James and James Ltd: London, 1998; pp 260-264.
- (44) Trentelman, K.; Stodulski, L.; Scott, D.; Back, M.; Stock, S.; Strahan, D.; Drews, A.; O'Neill, A.; Weber, W.; Chen, A.; Garrett, S.: The characterisation of a new pale blue corrosion product found on copper alloy artifacts. *Studies in conservation* **2002**, 47, 217-227.

- (45) Iverson, T.; Kolar, J. "Effect of nitrogen dioxide on paper," 1991.
- (46) Linnow, K.; Halsberghe, L.; Steiger, M.: Analysis of calcium acetate efflorescences formed on ceramic tiles in a museum environment. *Journal of Cultural Heritage***2007**, *8*, 44-52.
- (47) Wheeler, G.; Wypyski, M.: An unusual efflorescence on Greek ceramics. *Studies in conservation***1993**, *38*, 55-62.
- (48) Scott Williams, R.; Waddington, J.; Fenn, J., . Infrared spectroscopic analysis of Central and South American amber exposed to air pollutants, biocides, light, and moisture,. *Collection forum***1990**, *6*, 65-75.
- (49) Thickett, D.; Cruickshank, P.; Ward, C.: The conservation of amber. *Studies in Conservation***1995**, *40*, 217-226.
- (50) Waddington, J.; Fenn, J.: Preventive conservation of amber: some preliminary investigations. *Collection Forum***1988**, *4*, 25-31.
- (51) Blades, N. "Nitrogen dioxide and sulphur dioxide measurement at the British library and national library of Wales," 1997.
- (52) Larsen, R.: Fundamental aspects of the deterioration of vegetable tanned leathers. PhD, School of conservation, 1995.
- (53) Larsen, R.: Deterioration and conservation of vegetable tanned leather. *European Cultural Heritage Newsletter on Research***1997**, *10*, 54-61.
- (54) "Improved Protection of Paintings during Exhibition, Storage and Transit," 2010.
- (55) Bonaduce, I.; Odlyha, M.; Di Girolamo, F.; Lopez-Aparicio, S.; Grontoft, T.; Colombini, P.: The role of organic and inorganic indoor pollutants in museum environments in the degradation of dammar varnish. *Analyst***2013**, *138*, 487-500.
- (56) Drisko, K.; Cass, G. R.; Whitmore, P. M.; Druzik, J. R.: Fading of artists' pigments due to atmospheric ozone. In *Wiener Berichte über Naturwissenschaft in der Kunst*; Vendl, A., Pichler, B., Weber, J., Banik, G., Eds., 1985; pp 66-89.
- (57) Brokerhof, A.; Van Bommel, M.: Deterioration of calcareous materials by acetic acid vapour: a model study. In *ICOM committee for conservation, 11th triennial meeting*: Edinburgh, Scotland, 1996.
- (58) Byne, L.: The corrosion of shells in cabinets. *Journal of Conchology***1899**, *9*, 253-254.
- (59) Fitzhugh, E.; Gettens, R.: Calcite and other efflorescent salts on objects stored in wooden museum cases. In *Science and archaeology*; Brill, R., Ed.; MIT Press Cambridge, 1971; pp 91-102.
- (60) Gibson, L. T.; Cooksey, B. G.; Littlejohn, D.; Tennent, N. H.: Investigation of the composition of an unique efflorescence on calcareous museum artifacts. *Analytica Chimica Acta***1997**, *337*, 253-264.
- (61) Johansson, L.-G.; Lindqvist, O.; Mangio, R. E.: Corrosion of calcareous stones in humid air containing SO₂ and NO₂. *Durability of building materials***1988**, *5*, 439-449.
- (62) Glastrup, J.; Shashoua, Y.; Egsgaard, H.; Mortensen, M.: Degradation of PEG in the warship Vas. *MACROMOLECULAR SYMPOSIA***2006**, *238*, 22-29.
- (63) Robinet, L.; Hall, C.; Eremin, K.; Fearn, S.; Tate, J.: Alteration of soda silicate glasses by organic pollutants in museums: Mechanisms and kinetics. *Journal of Non-Crystalline Solids***2009**, *355*, 1479-1488.
- (64) Gibson, L. T.; Cooksey, B. G.; Littlejohn, D.; Linnow, K.; Steiger, M.; Tennent, N. H.: The mode of formation of thecotrichite, a widespread calcium acetate chloride nitrate efflorescence. *Studies in Conservation***2005**, *50*, 284-294.
- (65) C., A.; M., M.: The effect of nitrogen oxides in atmospheric corrosion of metals. *Corrosion Scienc***1995**, *37*, 293-305.
- (66) Jaffe, L. S.: The effects on photochemical oxidants on materials. *Journal of the Air Pollution Control Association***1967**, *17* 375-378.
- (67) Lynn, Y.; Salmon, G.; Cass, G.: The ozone fading of traditional Chinese plant dyes. *Journal of AIC***2000**, *39*, 245-257.
- (68) Druzik, J.: Ozone: the intractable problem. *WAAC Newsletter***1985**, *7*, 3-9.
- (69) Saito, M.; Goto, S.; Kashiwagi, M.: Effect of the Concentration of NO₂ Gas to the Fading of Plant Dyes. *Scientific Papers on Japanese Antiques and Art Crafts***1993**, *38*, 1-9.
- (70) Saito, M.; Goto, S.; Kashiwagi, M.: Effect of the Concentration on NO₂ Gas to the Fading of Fabrics Dyed with Natural Dyes. *Scientific Papers on Japanese Antiques and Art Crafts***1994**, *39*, 67-74.

- (71) Shaver, C. L.; Cass, G. R.; Druzik, J. R.: Ozone and the deterioration of works of art. *Environmental science and technology***1983**, *17*, 748-752.
- (72) Saunders, D.; Kirby, J.: Light-induced damage: investigating the reciprocity principle. In *ICOM-CC 11th Triennial Meeting*; Bridgeland, J., Ed.; James and James, 1996; pp 187-90.
- (73) Whitmore, P. M.; Cass, G. R.: The fading of artists' colorants by exposure to atmospheric nitrogen dioxide. *Studies in Conservation***1989**, *34* 85-97.
- (74) Whitmore, P.; Cass, G. R.; Druzik, J. R.: The ozone fading of traditional natural organic colorants on paper. *Journal of the American Institute of Conservation***1987**, *26* 45-58.
- (75) Grosjean, D.; Whitmore, P. M.; De Moor, C. P.; Cass, G. R.; Druzik, J. R.: Fading of alizarin and related artists' pigments by atmospheric ozone. *21987*, *Environmental science and technology*, 635-643.
- (76) Gibson, L.; Watt, C.: Acetic and formic acids emitted from wood samples and their effect on selected materials in museum environments. *Corrosion Science***2010**, *52*, 172-178.
- (77) Thickett, D.; Odlyha, M.: Note on the identification of an unusual pale blue corrosion product from Egyptian copper alloy artifacts. *Studies in Conservation***2000**, *45*, 63-67.
- (78) Uhde, E.: Application of solid sorbents for the sampling of volatile organic compounds in indoor air. In *Organic Indoor Air Pollutants. Occurrence, Measurement, Evaluation*; Salthammer, T., Ed.; WILEY-VCH: Weinheim, 1999; pp 3-14.
- (79) Rosenberg, E.; De Santis, F.; Kontozova-Deutsch, V.; Odlyha, M.; van Grieken, R.; Vichi, F.: Measuring gaseous and particulate pollutants: Instruments and instrumental methods. In *Basic environmental mechanisms affecting cultural heritage, Understanding deterioration mechanisms for conservation purposes, COST Action D42*; Nardini: Firenze, 2010; pp 115-146.
- (80) Corrosion of metals and alloys - Corrosivity of atmospheres - Classification, determination and estimation., 2013; Vol. ISO 9223.
- (81) Corrosion of metals and alloys - Classification of low corrosivity of indoor atmospheres - Part 1: Determination of corrosion attack in indoor atmospheres. 2006; Vol. ISO 11844-1.
- (82) Corrosion of metals and alloys - Classification of low corrosivity of indoor atmospheres - Part 2: Determination of corrosion attack in indoor atmospheres., 2005; Vol. ISO 11844-2.
- (83) Svendsen, M.-R.: Corrosivity measurement of indoor museum environments using lead coupons as dosimeters. *Journal of Cultural Heritage***2008**, *9*, 285-294.
- (84) Schieweck, A.; Salthammer, T.: Emissions from construction and decoration materials for museum showcases. *Studies in Conservation***2009**, *54*, 218-235.
- (85) Schieweck, A.; Lohrengel, B.; Siwinski, N.; Salthammer, T.: Organic and inorganic pollutants in storage rooms of the Lower Saxony State Museum Hanover, Germany. *Atmospheric Environment* **2005**, *39*, 6098-6108.
- (86) Thickett, D.; Stanley, B.; Booth, K.: Retrofitting old display cases. In *ICOM-CC: 15th Triennial conference*: New Dehli, 2008; pp 775-782.
- (87) Thickett, D.: Sealing MDF to prevent corrosive emissions. *The conservator***1998**, 49-56.
- (88) Schieweck, A.; Salthammer, T.: Indoor air quality in museum showcases. *Journal of Cultural Heritage***2011**, *12*, 205-213.
- (89) Thickett, D.; David, F.; Luxford, N.: Air exchange rate - the dominant parameter for preventive conservation? *The Conservator***2005/6**, *29*, 19-34.
- (90) Thickett, D.; Luxford, N.: Development of showcases for archaeological metals in aggressive environments. In *METAL 2007*: Amsterdam, 2007; pp 105-109.
- (91) Indoor air - Part 8: Determination of local mean ages of air in buildings for characterizing ventilation conditions. Beuth Verlag: Berlin, 2008; Vol. DIN ISO 16000-8.
- (92) Thickett, D.; Short-Traxler, K.: Practical application of sorbents. In *METAL 2010: interim meeting of ICOM-CC metal working group*: Charleston, South Carolina, USA, 2010; pp 307-312.
- (93) Shashoua, Y.: Ageless oxygen absorbers. In *ICOM-CC Preprints of the 12th Triennial Meeting*; Bridgeland, J., Ed.; James and James, London: Lyon, 1999; pp 881-887.
- (94) MEMORI project, "Measurement, Effect Assessment and Mitigation of Pollutant Impact on Movable Cultural Assets. Innovative Research for Market Transfer. FP7-ENV-201, 2010 - 2013.
- (95) Maekawa, S.: *Oxygen-free Museum Cases*; Getty Conservation Institute: Los Angeles, 1998.

- (96) Townsend, J. H.; Thomas, J.; Hackney, S.; Lerwill, A.: The benefits and risks of anoxic display for colorants. In *Conservation and Access IIC*; Saunders, D., Townsend, J. H., Woodcock, Eds.: London, 2008.
- (97) Nicholson, C.; Ritzenthaler, M. L.: The Declaration of Independence, the United States Constitution and Bill of Rights: scientific basis and practice of encasement. In *Art on Paper: Mounting and Housing*; Rayner, J., Kosek, J. M., Christensen, B., Eds.; Archetype Publications: London, 2005; pp 75-80.
- (98) Beltran, V. B.; Druzik, J.; Maekawa, S.: Large scale assessment of light-induced color change in air and anoxic environments. *Studies in Conservation***2012** 57, 42-57.
- (99) Del Hoyo-Melendez, J. M.; Mecklenburg, M. F.: The use of micro-fading spectrometry to evaluate the light fastness of materials in oxygen-free environments. *Spectroscopy Letters***2011**, 44 113-21.

Il contesto dei contenitori trasparenti per l'esposizione di prodotti è molto vasto dal punto di vista delle tipologie funzionali, ma è possibile ridurre la distinzione a due tipi fondamentali: tipologie adibite alle esposizioni museali e quelle progettate per scopi commerciali.

Le prime richiedono, in fase di progettazione e posa in opera, un alto grado di rigore ed approfondimento del contesto.

La funzione delle teche espositive per gli allestimenti museali o comunque per esposizioni va oltre il mero mostrare il materiale oggetto delle collezioni, avendo infatti la finalità primaria di proteggere l'opera o il reperto da esporre, congiuntamente al requisito di valorizzarlo e, all'occorrenza, poter contenere informazioni sull'oggetto stesso.

Il dato essenziale da ricercare nella creazione di un contenitore ad uso espositivo è la stabilità della struttura.

Definiamo **La Stabilità** come la condizione per cui un dispositivo deve essere strutturalmente stabile nelle condizioni di funzionamento previste, cioè le sue prestazioni non si devono modificare nel tempo stimato di utilizzo, nè durante il trasporto o il deposito in magazzino.

Per molti settori merceologici esistono normative di standardizzazione sia della progettazione del prodotto, sia delle verifiche successive alla sua realizzazione, incluse le prove di resistenza o durata dei manufatti; nel nostro caso, ad esempio, devono essere scrupolosamente seguite le normative sulla tenuta delle pareti o delle cerniere.

Gli indirizzi generali che facilitano il rispetto delle condizioni necessarie per ottenere un progetto soddisfacente sono tre:

1.Semplicità: applicazione del **Principio di Semplicità** nella scelta delle soluzioni tecniche, forme, procedure di funzionamento e di produzione e numero di componenti.

2.Chiarezza: mancanza di ambiguità del progetto con chiare relazioni tra cause ed effetti, assenza di instabilità non pianificata, operatività comprensibile e ben guidata, prevedibilità delle situazioni e dei tempi tecnici ed infine manutenzione ridotta e semplificata.

3.Sicurezza: efficiente prevenzione di incidenti o danni a persone, apparecchiature e impianti o all'ambiente, ottenuta applicando le procedure standard previste dalla normativa, con adeguata progettazione e con un continuo riferimento al **Principio di Precauzione**.

Il principio di precauzione è citato nell'articolo 191 del trattato sul funzionamento dell'Unione europea (UE). Il suo scopo è garantire un alto livello di protezione dell'ambiente grazie a delle prese di posizione preventive in caso di rischio. Tuttavia, nella pratica, il campo di applicazione del principio è molto più vasto e si estende anche alla politica dei consumatori, alla legislazione europea sulla sicurezza in generale ed alla salute.

Nell'ambito della sicurezza come prevenzione di incidenti o danni a persone e cose, occorre sottolineare come la stabilità risulti un requisito basilare per i dispositivi in generale, ed i contenitori in particolare, che siano presenti un ambiente strutturato ed aperto al pubblico (cfr. il concetto di mostra o esposizione). Per prevenire occorre prevedere le modalità di sviluppo di possibili incidenti.

Incidente è definibile come un evento inatteso, indesiderato o indesiderabile quale risultante da azioni degli utenti/operatori e dalle modalità funzionali/gestionali del manufatto, che provoca danni a persone e/o cose.

La manifestazione degli incidenti è legata alle caratteristiche del prodotto e alla sua gestione o impiego in un sistema organizzato.

Il progettista deve cercare di garantire la **sicurezza diretta** del manufatto, cioè scegliere soluzioni tecniche che impediscano il nascere di situazioni pericolose, avendo particolare riguardo verso:

- la resistenza e affidabilità del prodotto e dei suoi componenti, che non devono rompersi in servizio, compromettendone la funzionalità e mettendo in pericolo operatori e fruitori;
- la sua funzionalità, che non deve creare rischi in servizio o durante la manutenzione;
- la sua architettura e configurazione esterna, che non deve creare rischi a cose e persone circostanti (e. g. per collisioni incidentali).

Quando la sicurezza diretta sia impossibile o esclusa da oggettive valutazioni costi/benefici, si deve ricorrere alla **sicurezza indiretta**: introduzione di sistemi di protezione speciali, fissi o mobili, collegati al prodotto o esterni.

Alle soluzioni di sicurezza indiretta vanno sempre aggiunte segnalazioni di pericolo, riportate sul sistema e nell'ambiente di utilizzo (ed esaurienti istruzioni nel MUM – Manuale di Uso e Manutenzione). Il ricorso alle segnalazioni di pericolo come unico sistema di sicurezza deve essere assolutamente evitato ed è vietato dalle principali normative in materia.

La sicurezza diretta strutturale si ottiene realizzando componenti e macchine intrinsecamente a prova di rottura, secondo i principi fondamentali della progettazione in sicurezza che sono elencati di seguito:

- **progettazione a vita infinita**: tutti i componenti sono progettati per durata infinita (la massima tensione ideale nel componente deve risultare adeguatamente inferiore al limite di fatica del materiale a tempo infinito) con elevata affidabilità. I sistemi sono progettati in modo da non presentare guasti funzionali o cali di sicurezza per un periodo molto superiore alla vita prevista.
- **progettazione safe-life** (a servizio garantito): tutti i componenti e i loro collegamenti sono realizzati per lavorare senza rotture o malfunzionamenti nella vita prevista (la tensione ideale massima del componente deve risultare adeguatamente inferiore al limite di fatica a tempo fissato). Tutti i sistemi devono garantire funzionamenti sicuri nella vita prevista.
- **progettazione fail-safe**: vi possono essere rotture di componenti (essenziali o secondari) o il collasso di un sottosistema durante la vita prevista della macchina o dell'impianto senza conseguenze gravi per persone o cose. Deve essere garantita una funzionalità residua che permetta di mettere in campo contromisure di sicurezza.
- **progettazione damage tolerant**: si stima la vita del componente in presenza di danni o difetti (Meccanica della Frattura) e si eseguono ispezioni periodiche per valutare la propagazione di fratture e la pericolosità della situazione raggiunta. I sistemi e i sottosistemi possono presentare un degrado funzionale durante la vita, monitorato e controllato per mantenere il livello di funzionalità e sicurezza residua entro i limiti di accettabilità.

- **principio della ridondanza:** la sicurezza è aumentata dall'incremento dell'affidabilità perché le funzioni di un componente o di un sottosistema collassato sono assicurate senza soluzione di continuità, in parte o in toto, da altri componenti. La ridondanza può essere attiva (i componenti lavorano contemporaneamente) o passiva (i componenti prendono servizio in sequenza al collasso del precedente). Inoltre la ridondanza può essere in serie (filtri), in parallelo (motori, pompe, sicurezze) o incrociata (impianti di frenatura, impianti di sicurezza).

Quadro normativo

Il tema sicurezza nei luoghi di lavoro e per estensione anche ai luoghi a forte frequentazione è importante perché molti rischi per l'operatore provengono dall'interazione del prodotto con l'ambiente di lavoro.

La normativa italiana nasce dalla Costituzione: la Repubblica Italiana tutela la salute dell'individuo (art. 32) e che inoltre l'iniziativa economica privata non può svolgersi in modo da recare danno alla sicurezza (art. 41). Nel Codice Civile (art. 2087) s'impone al datore di lavoro di adottare, nell'esercizio dell'impresa, le misure che (secondo la particolarità del lavoro, l'esperienza e la tecnica) sono necessarie a tutelare l'integrità fisica e la personalità morale del lavoratore.

Disposizioni più specifiche sono:

- **DPR 547/55** sulla prevenzione degli infortuni sul lavoro, con prescrizioni metodologiche e progettuali sulle macchine;
- **Il Dlgs 81/08 n°81** o "Testo unico sulla sicurezza" è la norma di recepimento della direttiva comunitaria 89/391CEE e contiene norme di carattere generale riguardanti il miglioramento della sicurezza e della salute dei lavoratori durante il lavoro. Esso si sostituisce in modo più rigoroso, alla normativa precedente.
- **UNI EN 15898:2011** Conservazione dei beni culturali - Principali termini generali e definizioni
- **UNI EN 15999-1:2014** Conservazione dei beni culturali - Linee guida per la progettazione di vetrine per l'esposizione e la conservazione di oggetti - Parte 1: Aspetti generali.

La Comunità Europea è intervenuta estesamente con norme che intendono garantire la libera circolazione dei prodotti, nella piena tutela della sicurezza e salute delle persone (operatori ed utenti), intesa come principio fondante del mercato unico europeo. Il 7/5/1985 il Consiglio dei Ministri dell'UE ha approvato una Risoluzione che teorizza la filosofia della sicurezza denominata Nuovo Approccio o Rinvio alle Norme. In questa filosofia, la normativa sulla sicurezza del lavoratore e del cliente/utente è organizzata in direttive e in specifiche attuative. Le direttive sono atti legislativi emessi dal Consiglio dei Ministri dell'Unione Europea, d'intesa con il Parlamento Europeo, e destinati agli Stati Membri che devono adottarle nelle legislazioni nazionali. In ogni direttiva è indicato il transitorio d'applicazione e la dead-line di recepimento dei contenuti nelle legislazioni nazionali. Dopo il recepimento, i cittadini degli Stati Membri, e chiunque voglia esportare in questi Stati, hanno l'obbligo di rispettare sia la direttiva sia l'atto legislativo di recepimento nazionale.

Le direttive di prodotto stabiliscono :

- a) i requisiti essenziali dei prodotti a libera circolazione nella CE e
- b) le procedure di attestazione della conformità. I requisiti essenziali permettono il raggiungimento delle condizioni di sicurezza più avanzate e tecnologicamente possibili per la tutela dei cittadini e dei lavoratori. I principi ispiratori della strategia comunitaria sono:

- la libera circolazione è garantita ai prodotti rispondenti ai requisiti essenziali di sicurezza definiti nelle direttive;
- l'interpretazione tecnica dei requisiti essenziali è demandata alle norme armonizzate;
- l'applicazione volontaria delle norme attiva il principio di presunzione di conformità: se un prodotto è progettato e costruito seguendo le norme armonizzate di una direttiva, si presume che esso sia conforme anche ai requisiti essenziali della direttiva stessa;
- la dimostrazione della conformità ai requisiti avviene tramite procedure specifiche di valutazione della conformità ed è attestata dalla dichiarazione CE di conformità;
- sul prodotto deve comparire la marcatura CE.

Ricordiamo che nella norma UNI EN 15999-1 del 2014 *“Conservazione dei beni culturali - Linee guida per la progettazione di vetrine per l'esposizione e la conservazione di oggetti - Parte 1: Aspetti generali”*, sono indicate oltre alle funzioni delle teche, i criteri di progettazione e selezione delle stesse. Con indicazioni del ricambio d'aria minimo garantito, il rispetto delle condizioni dell'oggetto e della sua fragilità, nonché della sua natura materiale sia fisica che chimica.

L'applicazione dei principi statici alla stabilità delle teche

Per resistenza strutturale si intende che i componenti del dispositivo non debbano rompersi nelle condizioni di funzionamento indicate nella progettazione; comunque deve essere indicata la tipologia e frequenza di ispezioni manutentive.

Nella norma UNI EN 15999-1/2014 esistono le specifiche per il comportamento dei componenti, con particolare attenzione per le parti mobili, pareti o sportelli. Essa individua differenti tipologie di rischio.

Ad esempio, nell'ambito della tipologia di rischi di funzionamento, legata alla fase di montaggio del manufatto, il contenitore non deve assumere configurazioni che possano costituire un rischio per l'operatore. Occorre quindi evitare spigoli e finiture superficiali che possano causare lesioni oppure adottare protezioni adeguate nel caso siano riscontrabili dei rischi. Gli elementi mobili, se non intrinsecamente sicuri, devono essere muniti di protezioni o dispositivi di protezione per prevenire danni alle persone.

Nell'ambito dei rischi dovuti ad errori di montaggio, si devono sviluppare sequenze di montaggio che minimizzino gli errori di montaggio. Eventuali errori di connessione (specialmente in cerniere e cavi elettrici) non devono generare rischi. Si consiglia di usare indicazioni pittografiche sui pezzi per guidare le connessioni.

Si noti che l'entità del rischio R è individuabile come prodotto dell'entità del danno M (magnitudo) per la probabilità P che l'evento dannoso si verifichi. Una logica conseguenza della moderna accurata progettazione dei manufatti porta a ridurre, o a rendere molto improbabili, guasti o incidenti molto dannosi. Se la progettazione non è accurata e adeguatamente controllata, la distribuzione statistica degli eventi di danno può alterarsi (in peggio!) in modo significativo.

Per ogni componente devono essere eseguite l'analisi, l'eliminazione dei rischi e l'adozione (o indicazione) di contromisure per i rischi residui. Tali eventuali rischi residui (non eliminati con revisioni progettuali o interventi preventivi/protettivi) devono essere individuati ed elencati assieme con le indicazioni per contrastarne gli effetti in servizio. Le relative istruzioni devono essere sempre espone per esteso nel MUM.

Per ogni rischio citato nell'allegato I della Direttiva Macchine, va specificata l'operazione (e gli operatori addetti) coinvolta: T Trasporto - I Installazione - F Funzionamento - Re Regolazione - M Manutenzione - P Pulitura - Ri Riparazione. In presenza di non conformità si riporta l'indicazione NC e si indicano le procedure per rendere conforme la macchina, in riferimento alle linee guida per la sicurezza.

MANUALE DI USO E MANUTENZIONE (MUM) deve contenere tutte le informazioni necessarie e sufficienti a montare, installare, mettere in funzione, mantenere e riparare (con piena sicurezza dell'operatore e dei tecnici addetti alle altre attività) il manufatto. Vi si trovano i riferimenti normativi tecnici (con eventuali certificazioni di Qualità Totale ISO) e le modalità di collegamento con uffici di assistenza e vendita della Ditta produttrice del contenitore (e della Ditta commercializzatrice, se non coincidente con il produttore) e delle Ditte produttrici di tutte le parti commerciali.

INSTALLAZIONE:

- smontaggio per trasporto,
- trasporto dei componenti (incluse operazioni di carico, scarico e indicazioni per lo stivaggio ed immagazzinamento),
- operazioni di piazzamento e fissaggio (incluse le eventuali specifiche di isolatori contro vibrazioni, correnti parassite etc..),
- assemblaggio delle parti elettriche ed elettroniche,
- assemblaggio delle parti pneumatiche,
- assemblaggio delle parti oleoidrauliche,
- operazioni di messa a punto e primo avviamento,
- specifiche di rodaggio,
- reinstallazione,
- demolizione e smaltimento dei relitti e rifiuti.

SICUREZZA DEI MATERIALI

La normativa nazionale, europea (vedi Regolamento REACH) e internazionale sui materiali utilizzati nella produzione di manufatti, sottolinea l'importanza di riconoscere e approfondire il problema dei potenziali pericoli per la salute e per la sicurezza presenti in molti materiali e sostanze chimiche. Gli effetti dannosi diretti ed indiretti (effetti teratogeni etc.), sulle persone esposte, dei materiali costituenti un manufatto si esplicano in relazione a tre diverse situazioni:

1. Produzione: per esposizione a prodotti chimici usati nella fabbricazione dei materiali o costituenti reflui o cascami. L'esposizione può essere continua (operatori), accidentale (popolazione) o incidentale (per malfunzionamenti degli impianti). Il problema è principalmente di salvaguardia ambientale e sicurezza del lavoro, il progettista può intervenire scegliendo oculatamente i materiali.
2. Uso: per esposizione, continua o accidentale-incidentale, a materiali costituenti i manufatti, a sostanze rilasciate nell'ambiente dal manufatto (contenute come solventi o per effetto dell'attacco ambientale) o a sostanze impiegate per l'uso o la manutenzione.
3. Dismissione: per l'impatto ambientale dei materiali dismessi, come attacco diretto o inquinamento dell'habitat naturale.

Il progettista deve sviluppare soluzioni e scegliere materiali sicuri da tutti i punti di vista. E' facile riconoscere la pericolosità diretta dei materiali o dei rilasci in caso di incidenti (tossicità dei fumi originati dalla combustione accidentale di materie plastiche, legni trattati etc.), ma è difficile e

costoso il controllo, o l'eliminazione, dei rilasci tossici da materiali non tossici in sé e per sé nell'uso normale. Questo può portare a tentazioni negazioniste od omissive. Si porta l'esempio dei rilasci di composti organici tossici da parte di materiali usati nel settore dell'arredo (mobili, accessori etc.) e dei casalinghi in senso lato. Molte materie plastiche (comprese le vernici, onnipresenti) rilasciano in continuità quantità decrescenti asintoticamente di composti organici (tossici, cancerogeni e teratogeni) sotto forma gassosa nell'ambiente o in soluzione in acqua (o in altri liquidi con cui vengano a contatto). Tutti i materiali legnosi compositi (costituiti da fibre, strati o granuli di legno legati da adesivi organici) rilasciano piccole quantità di gas (principalmente formaldeide), tossici a breve e/o a lungo termine, per lungo tempo dopo la fabbricazione.

Tipologie e caratteristiche delle teche espositive

La teca espositiva è definita, anche dalla normativa, come un contenitore con almeno un lato trasparente per la fruizione del pubblico, dotata di uno spazio espositivo, all'interno del quale porre il soggetto da esporre ed eventualmente lo spazio per pannelli informativi, più uno spazio per contenere eventuali dispositivi per la cura e la protezione.

La teca è caratterizzata ovviamente anche dal tipo di apertura, che deve poter permettere, oltre alla movimentazione in sicurezza del materiale esposto, anche gli interventi di ordinaria pulizia e manutenzione della teca stessa. E' da prevedere anche, nel caso se ne manifesti la necessità, la adattabilità alla presenza di dispositivi per il monitoraggio delle condizioni del microclima interno della teca o della quantità di luce a cui è sottoposto il soggetto.

Le tipologie costruttive delle teche si rifanno a due tipi fondamentali quella con telaio strutturale e quelle a lastre, differenziabili con riferimento loro stabilità strutturale ed al modo di applicazione dei carichi verticali/orizzontali. Per alcuni lavori può essere più adatto il sistema costruttivo a lastre, per altri invece quello a telaio, oggi più diffuso per la maggiore flessibilità e versatilità realizzative.

Nel caso, ad esempio, di una struttura in pannelli di cristallo portanti per elementi espositivi, si utilizzano solitamente pareti da minimo 10mm di spessore, in grado di conferire rigidità alla struttura, mentre nel caso di una struttura a Telaio, in cui la rigidità dell'assieme è rimandata al telaio portante, si possono utilizzare pannelli vetrati molto più sottili. La struttura a telaio appare quindi più leggera, più facilmente trasportabile, maggiormente gestibile/flessibile in fase d'uso.

Il materiale trasparente è essenzialmente vetro o acrilico, anche se, data la natura "museale" degli espositori, si preferisce nella grande maggioranza dei casi l'uso del vetro per le sue migliori caratteristiche visive.

Un'altra specifica che fa preferire il vetro a materiali plastici è la possibilità di ottenere lastre di qualsiasi dimensione e spessore, anche rinforzato, contenendo le deformazioni e mantenendo caratteristiche ottime di trasparenza e durata.

In genere quando si parla di strutture a telaio ci si riferisce usualmente ai telai in alluminio estremamente leggeri, composti da profilati molto sottili, eventualmente controventati in corrispondenza dei nodi di assemblaggio. Gli impianti spesso passano all'interno della struttura, così da garantire il minimo ingombro visivo. Offrono i vantaggi tipici delle strutture a telaio cioè una maggiore versatilità di disegno e la possibilità di prevedere all'interno della struttura accorgimenti di sicurezza (anche di tipo statico, quali gli attenuatori) e con la comparsa dei Led si va diffondendo il ricorso ad un'illuminazione diffusa integrata nella struttura.

La struttura a lastre, anche detta “a tutto vetro”, è caratterizzata dalla possibilità di ridurre l’impatto visivo di una struttura a telaio ed è perciò preferita nella fruizione “a tutto tondo” di un’opera o di un reperto, con particolare riguardo a sculture e manufatti particolari la cui godibilità necessita di una visione a 360°. Questo tipo di espositore gode di una certa libertà di posizionamento, ma paga il pegno di un equilibrio più precario non avendo il supporto di una parete.

Data la struttura minimale dei componenti si rende più complicato il progetto dell’illuminazione o della presenza di dispositivi accessori, confinandoli nella base o in un eventuale cappello non trasparente.

Si possono evidenziare alcune altre differenze di comportamento strutturale prendendo in considerazione le varie azioni a cui può essere sottoposto l’involucro, ossia: carichi verticali, carichi orizzontali (fenomeni sismici, urti accidentali ecc...), resistenza al fuoco, resistenza agli urti e umidità.

Le strutture a pannelli si prestano molto bene nel caso di applicazione di carichi orizzontali, come verrà evidenziato nel seguito.

Carichi orizzontali

Dal punto di vista dei carichi orizzontali dobbiamo distinguere le azioni che agiscono all’interno del piano della lastra (i.e. sisma, in quanto le sollecitazioni orizzontali possono facilmente essere generate da sismi, evento che nel nostro Paese diventa sempre più frequente.) da quelle che agiscono fuori dal piano (una forza applicata ortogonalmente).

Le strutture dei contenitori si comportano nei confronti delle azioni sismiche come delle scatole, con pareti e lastre molto rigide nei confronti delle azioni nel loro piano.

Il semplice schema che segue illustra molto bene il comportamento di una struttura scatolare:

per azioni nel piano le pareti resistono tranquillamente, mentre per azioni fuori dal piano esse hanno una minor resistenza e il sistema collassa, aprendosi.

Attraverso delle connessioni agli angoli con il cappello e la base, le azioni vengono trasmesse alle pareti nel piano del sisma, e ciò conferisce alla struttura estrema resistenza e bassa deformabilità. Una cornice continua consente, quindi, di collegare longitudinalmente elementi piani verticali di controvento, consentendo la redistribuzione delle azioni orizzontali fra di essi e conferendo maggiore iperstaticità e stabilità al sistema resistente.

Dal punto di vista del singolo pannello soggetto ad un’azione tagliante nel piano i meccanismi deformativi possono essere tre:

Traslazione rigida, rotazione rigida e deformata a taglio del pannello.

In figura si riporta una schema dei principali contributi di deformazione della parete:

1. deformazione a taglio della parete a lastra (il contributo flessionale può essere generalmente trascurato se il rapporto tra base ed altezza della parete è circa unitario)
2. deformazione traslazionale rigida (dovuta al contributo della deformazione degli angolari o dei connettori a taglio alla base della parete);
3. deformazione rotazionale rigida (tiene in considerazione il contributo di deformazione dei fermi posti alla base della parete).

Inserire figura “rigidezza_parete.jpg”

I primi due tipi di sollecitazione vengono contrastati da opportuni elementi di fissaggio quali semplici staffe metalliche progettate per resistere ad azioni taglianti o di trazione.

Il terzo contributo è pressoché assente nelle strutture a lastre di cristallo, in quanto si tratta di un sistema costituito da più lastre bloccate in alto o in basso da una struttura rigida in legno o metallo tali da renderle solidali tra loro e quindi, ricostruendo il tipico “comportamento a scatola” risulta essere un sistema estremamente rigido.

Nel caso delle strutture a telaio (di solito metallico) invece, è fondamentale la presenza degli elementi di controventamento fissati al sistema di montanti verticali ed elementi orizzontali. Infatti nel sistema a telaio l'elevato numero di elementi, metallici o in plastica/composito, che compone il manufatto, conferisce al sistema grande duttilità, che da un lato permette una migliore dissipazione dell'energia sviluppata da un eventuale sisma, dall'altro richiede soluzioni per contenere le deformazioni al di sotto dei calcolati limiti di tolleranza della struttura.

La maggiore duttilità del sistema determina che, a parità di evento, il sistema a telaio sviluppi un'azione tagliente alla base inferiore rispetto a quello a lastre.

Deformazione dei collegamenti alla base della vetrata

La rigidità della struttura è legata in larga parte alla cedevolezza delle connessioni alla base della parete (fermi, staffe e squadrette, ecc.), contribuendo in maniera significativa allo spostamento orizzontale della teca. Per tali motivi la resistenza degli irrigidimenti e degli eventuali attenuatori (in ambito sismico) deve essere valutata in maniera appropriata in funzione della rigidità e della resistenza di taglio del singolo pannello / parete.

Per quanto riguarda la deformazione di traslazione rigida, il contributo allo spostamento orizzontale risulta legato proporzionalmente al numero di connettori a taglio posti alla base o alla sommità della lastra, cioè al numero di ancoraggi. La resistenza della lastra alla traslazione rigida risulta quindi linearmente proporzionale alla lunghezza del lato “attaccato a terra o a parete”.

Inserire figura “sollec_orizzontali.jpg”

In condizioni sismiche, per effetto di una forza orizzontale in sommità al pannello, trascurando l'effetto di traslazione orizzontale su descritto, possiamo affermare che il pannello tende a ruotare facendo perno, in prima approssimazione, attorno ad un suo spigolo. La rotazione avviene effettivamente nel caso di rottura di uno o più fissaggi dell'attacco a terra o a parete.

Inserire figura “sollec_piano.jpg”

Eventi sismici

L'Italia è uno dei Paesi a maggiore rischio sismico del Mediterraneo, sia per la frequenza dei terremoti che hanno storicamente interessato il suo territorio, sia per l'intensità che alcuni di essi hanno raggiunto, determinando un rilevante impatto sociale ed economico. La sismicità della penisola italiana è legata alla sua particolare posizione geografica: è situata, infatti, nella zona di convergenza tra la zolla africana e quella eurasiatica ed è sottoposta a forti spinte compressive, che causano l'accavallamento dei blocchi tettonici.

Per opere d'arte custodite in chiese e musei non si può prescindere dalla necessità di proteggere i singoli oggetti con sistemi pensati ad hoc, in aggiunta a quanto è stato già previsto per il manufatto edilizio. Il problema ovviamente è quello d'impedire alle sollecitazioni a cui è soggetto l'edificio di trasferirsi al contenitore ed infine agli oggetti esposti danneggiandoli.

Nel caso in cui si ricada in aree a rilevante rischio sismico, occorre prevedere, in fase di progettazione delle teche, l'utilizzo di dispositivi dedicati, capaci di abbattere le sollecitazioni e/o mitigarne gli effetti, i cosiddetti attenuatori sismici.

La decisione di adottare un attenuatore deve conseguire allo studio dell'edificio in cui la teca è posta, ossia alla verifica dell'entità delle vibrazioni indotte da un eventuale sisma sull'edificio, e quindi sugli allestimenti interni. Potrebbe rendersi necessario progettare un sistema per ridurre tali vibrazioni attraverso dei dispositivi di controllo, ossia affiancando alla struttura portante della teca uno o più attuatori che, operando secondo diversi principi di funzionamento, riescano a ridurre la risposta dinamica, anche adeguando le proprie caratteristiche a quelle della forzante e del sistema strutturale.

Esistono in commercio molteplici dispositivi del genere, la cui scelta deve variare in funzione dell'intensità di rischio sismico e della fragilità del reperto da proteggere. Presentare una casistica generalizzata delle soluzioni è pressoché impossibile a causa della varia natura fisica dei reperti e delle differenze dei materiali esposti, senza considerare le condizioni al contorno delle esposizioni che variano a dipendere dal tipo di fruizione a cui sono legati (all'aperto od al chiuso, in spazi dedicati o allestiti in sedi monumentali, esposizioni fisse o temporanee, ecc...)

Sul mercato sono da anni presenti diverse tipologie di isolatori sismici che si differenziano per i metodi costruttivi utilizzati e per le loro caratteristiche. Una classificazione riconosciuta in letteratura prevede la definizione di tre categorie: gli isolatori elastomerici, gli isolatori elasto-plastici e gli isolatori a scorrimento.

In generale un sistema d'isolamento strutturale adeguato deve possedere le seguenti caratteristiche:

- una buona capacità rientrante, cioè la capacità di riportare la struttura nella posizione iniziale una volta terminato il sisma;
- una rigidità elevata per azioni dinamiche di modesta entità, così da impedire che il sistema esibisca spostamenti laterali significativi per azione del vento;
- rigidità e smorzamento poco sensibili ad effetti quali le variazioni di temperatura, l'invecchiamento dei materiali, ecc.

Tali dispositivi hanno in genere pianta quadrata o circolare, così da presentare un comportamento il più possibile indipendente dalla direzione dell'azione orizzontale agente.

Nell'allestimento e nel riordino di un Museo deve essere sempre affrontato il problema del rischio sismico (come del resto dei rischi di tutti i generi) a cui sono esposti gli oggetti d'arte: la sua riduzione richiede infatti accorgimenti e tecniche specifiche, progettate in relazione alla tipologia degli oggetti ed alla sismicità della zona.

Il problema può essere risolto, in via di principio, adottando accorgimenti sofisticati ma generalmente costosi, quali l'adozione di basi isolanti per ciascuno degli oggetti interessati.

Soluzioni di questo tipo hanno trovato qualche valida ed efficiente applicazione ed hanno recentemente dato origine ad alcuni brevetti; non sono però generalizzabili, poiché il numero degli oggetti da proteggere è talmente elevato da renderle, e non solo per il loro costo, impraticabili.

A dipendere dalla tipologia del contenitore in cui si trovano gli oggetti esposti e dal tipo di allestimento, cambiano i criteri di protezione :

- per gli oggetti esposti all'interno di teche: nell'impedire le oscillazioni e nel permettere un limitato scorrimento o rotolamento sul piano d'appoggio;
- per gli oggetti all'interno di vetrine poggianti direttamente sul pavimento: nella disposizione alla base degli stessi di apparecchi isolatori/dissipatori di diversa tipologia;
- per gli oggetti inseriti in bacheche fissate a parete: nella possibilità di scivolamento senza urti sulla parete, limitando lo scivolamento mediante dispositivi che forniscono un attrito controllato e garantiscono la dissipazione d'energia;
- per contenitori sospesi al soffitto: nel controllo della resistenza degli ancoraggi e nella verifica della lunghezza della sospensione, in modo da garantire l'efficienza della connessione al soffitto e da limitare l'ampiezza degli spostamenti massimi;

Il requisito necessario per installare un sistema di isolamento alla base è che la teca sia in grado di muoversi rispetto al pavimento della stessa quantità dell'isolatore.

E' pertanto necessario predisporre un piano di separazione sulla struttura per permettere questi movimenti.

La posizione di tale piano dipende principalmente dalle scelte progettuali.

- gli isolatori si possono montare sopra la base, la struttura è costruita sopra di essi;
- si possono posizionare gli isolatori anche all'interno della struttura, in prossimità dei nodi strutturali.

La scelta del tipo di smorzatore da adottare viene operata volta per volta a seconda della natura del tipo di oggetto da esporre. L'azione protettiva si esplica solo dopo che l'oggetto da esporre è stato posto entro il contenitore, e questo posizionato sopra gli smorzatori.

Nella fase di il trasporto di opere d'arte e di oggetti delicati, il problema viene normalmente affrontato predisponendo sistemi di imballaggio ad hoc, in genere non riutilizzabili, che possono essere particolarmente complicati e costosi, specie per piccoli spostamenti.

In ogni caso, le vibrazioni e gli urti nelle fasi di carico e scarico entro i contenitori non sono assorbite, ed è proprio in queste operazioni che la percentuale di incidenti dovuta all'errore umano è statisticamente significativa.

Bibliografia:

Brooke Craddock, A, Construction materials for storage and exhibition, **Conservation concerns. A guide for collectors and curators**. Cooper-Hewitt Museum and Smithsonian Institution, New York (1992).

Vaudetti Marco, Canepa Simona, Musso Stefania **Esporre, allestire, vendere. Exhibit e retail design**. WOLTERS KLUWER ITALIA — Anno 2014

Quadro normativo:

Norma UNI 15898, "Conservazione dei beni culturali, principali termini e definizioni", luglio 2012.

Norma UNI EN 15999 “Conservazione dei beni culturali - Linee guida per la progettazione di vetrine per l'esposizione e la conservazione di oggetti” - Parte 1: Aspetti generali, gennaio 2014.