

**PROGETTO TECNOPRIMI
RAPPORTO TECNICO FINALE**

TECNOLOGIE DI INTERESSE GENERALE

TECNOLOGIE PER I BENI CULTURALI

(a cura di Mauro Matteini)

31 LUGLIO 2008

INDICE

SINTESI E CONCLUSIONI

PARTE PRIMA QUADRO DI RIFERIMENTO

1. I Beni Culturali: ambiti dell'indagine	7
2. Il sistema dei Beni Culturali nel quadro italiano	8
3. Gli ambiti di attività dei Beni Culturali	9
4. I driver dell'innovazione.....	12
5. Strategie per la diffusione delle nuove tecnologie nel sistema italiano dei Beni Culturali	14
6. Le tipologie aziendali interessate al settore.....	15

PARTE SECONDA LE PRINCIPALI AREE TECNOLOGICHE PER I BENI CULTURALI

7. Le aree tecnologiche del ciclo dei Beni Culturali.....	17
8. Strumentazioni non invasive e micro-distruttive per indagini archeometriche e indagini diagnostiche.....	18
9. Materiali e metodi per il restauro	26
10. Tecnologie di monitoraggio.....	33
11. Tecnologie di digitalizzazione delle immagini bidimensionali.....	38
12. Sistemi di climatizzazione e di controllo della qualità dell'aria in ambienti museali	43
13. Vetrine di esposizione museali.....	49
14. Tecniche di illuminazione nei Beni Culturali.....	55
15. Sensoristica di allarme e sistemi correlati di intervento per la sicurezza e la salvaguardia dei Beni Culturali.....	62
16. L'impiego di tecnologie informatiche e di comunicazione (ICT) nei Beni Culturali...	69

SINTESI E CONCLUSIONI

L'attenzione progressiva che i Beni Culturali (BB.CC.) stanno ricevendo nella società contemporanea non solo da parte di tutti i generi di media - televisione, giornali, settimanali, libri, internet, ecc. -, ma anche e soprattutto da masse sempre più numerose di turisti, grazie alle straordinarie possibilità di mobilità oggi a disposizione, pone questo settore tra quelli di punta dell'economia. Ciò è tanto più vero per l'Italia, indiscusso paese-simbolo dei BB.CC.. In questo scenario è naturale che la politica, a livello sia nazionale che locale, guardi con motivato interesse al fenomeno e cerchi di incentivarlo favorendone le condizioni di sviluppo. Sebbene a prima vista possa apparire contraddittorio, le moderne tecnologie, nelle loro diverse e molteplici espressioni, possono giocare un ruolo veramente cruciale nella valorizzazione del Patrimonio Culturale e, di riflesso, nella sua fruizione al fine di meglio motivarla, qualificarla e anche ampliarla; in definitiva, quindi, correlandola con l'intero indotto economico legato al turismo. La delicatezza propria del settore, tuttavia, richiede un ingresso misurato, discreto e sempre qualificato delle tecnologie, una condizione di cui le aziende interessate devono costantemente tener conto.

Il documento è articolato in due parti.

Nella **prima parte** viene tracciato il quadro di riferimento generale, prendendo in esame il sistema dei BB.CC. a livello sia globale sia più specificatamente italiano, con i diversi attori che vi operano e le diverse competenze, umanistiche, scientifiche e tecnico-operative, tra le quali si manifestano spesso comprensibili difficoltà di comunicazione, sebbene i beni del Patrimonio Culturale in tutte le attività a essi connesse, richiedano sistematicamente strategie di approccio multi-disciplinari. Si illustrano poi i molteplici ambiti di attività che li riguardano (*conoscenza, conservazione, valorizzazione, fruizione, salvaguardia, sicurezza, documentazione e catalogazione*) soffermandosi, per ciascuno di essi, sui significati concettuali, le relative articolazioni e i soggetti coinvolti. In due successivi paragrafi si cercano di individuare, per ciascuna attività, i *driver* dell'innovazione e le strategie atte a favorire la diffusione delle nuove tecnologie nel sistema italiano dei BB.CC.. In ultimo si esaminano criticamente le tipologie di imprese per le quali appare più immediata e probabile la possibilità di cimentarsi in una politica di innovazione a favore di questo complesso settore.

Nella **seconda parte**, dopo aver introdotto il quadro delle relazioni tra i diversi profili di attività e le categorie sopra elencate, viene individuata circa una decina di tematiche ritenute più promettenti in relazione allo sviluppo dell'innovazione tecnologica da parte di aziende ad alta tecnologia insieme a enti di ricerca e in stretta sintonia con i referenti istituzionali dei BB.CC.. Le tematiche spaziano lungo un fronte assai vasto proprio in risposta alle polivalenti realtà che caratterizzano i BB.CC.: le **'strumentazioni per il monitoraggio'**, le **'immagini digitali'**, l'**'illuminotecnica'**, **'i materiali e i metodi di restauro'**, le **'vetrine di esposizione museali'**, le **'strumentazioni per indagini archeometriche e diagnostiche'**, i **'sistemi di climatizzazione degli ambienti museali'**,

le **‘tecnologie ICT’** e la **‘sensoristica per la sicurezza e salvaguardia’**. Per ciascuna di esse si ripercorre il significato e lo sviluppo storico, si traccia lo stato dell’arte e si individuano carenze e aspettative, in riferimento agli effettivi bisogni del settore. Ciò al fine di offrire un indirizzo verso potenziali implementazioni di strumenti, prodotti, sistemi, *software*.

CONCLUSIONI

- 1) Il sistema dei BB.CC. è caratterizzato da esigenze di intervento tecnologico peculiari e differenziate, che attraversano tutti i diversi ambiti della “vita” di un bene; perciò il settore offre vaste potenzialità di applicazione per nuove tecnologie provenienti dai più diversi ambiti disciplinari, dai materiali alle biotecnologie alle nanotecnologie alla sensoristica alle tecnologie dell’informatica e delle comunicazioni (ICT);
- 2) peraltro, la dimensione economica del mercato dei BB.CC. è alquanto limitata rispetto a quella di altri mercati, dove le medesime tecnologie hanno primariamente trovato applicazione; ne consegue che le imprese che dispongono di tecnologie atte a essere destinate anche al settore dei BB.CC. difficilmente sviluppano innovazioni di processo e prodotto *ad hoc*, ma preferiscono proporre soluzioni già adottate o, nei casi più favorevoli, adeguamenti alle specifiche esigenze;
- 3) il problema critico per lo sviluppo del mercato di nuove tecnologie concepite specificamente per il settore dei BB.CC. è quello della creazione di una massa critica della domanda, sufficientemente ampia da attrarre investimenti industriali di carattere innovativo, in assenza del quale il finanziamento della ricerca e sviluppo rischia di non essere adeguato. In tal senso le mostre sono delle occasioni pilota di grande rilevanza. Per propria natura esse ospitano innovazione e ricevono grande attenzione. In alternativa, si possono promuovere progetti dimostrativi di grande dimensione per l’attuazione di tecnologie innovative, sostenuti finanziariamente da enti nazionali e locali in stretta collaborazione con le istituzioni preposte al presidio dei beni;
- 4) un’ulteriore condizione di sviluppo di processi virtuosi per lo sviluppo del mercato e dell’innovazione è data dalla formazione di figure professionali adeguate, “*Conservation Scientist*”, da prevedere negli organici delle istituzioni museali e di gestione dei BB.CC., in grado di colloquiare sul piano scientifico e tecnologico con pari dignità con gli esperti dei centri di ricerca e delle imprese.

PARTE PRIMA

QUADRO DI RIFERIMENTO

1. I BENI CULTURALI: AMBITI DELL'INDAGINE

A una parte importante della produzione umana - soprattutto quella che non ha carattere di replica routinaria ma identifica a vari livelli il concetto di creatività - ci si riferisce con espressioni quali BB.CC., Patrimonio Culturale e termini simili.

A seconda delle tipologie dei beni, dei tempi e dei contesti, queste espressioni assumono significati che possono differire alquanto. Esistono BB.CC. immateriali come, ad esempio, la lingua, la produzione musicale, poetica, narrativa. Esistono beni materiali, come una moneta, una statua, un dipinto, un edificio architettonico, accomunati, appunto, dall'essere costituiti da materiali e articolati in strutture fisiche. Un Bene Culturale può anche corrispondere a un insieme di oggetti e strutture tra loro correlati dall'appartenere a uno stesso luogo e, soprattutto, a una medesima cultura. Tale, per esempio, è un sito archeologico.

Oggetti diversi possono anche condividere territori di dimensioni più o meno vaste, pur essendo comunque improntati da una cultura che li accomuna: si parla allora di paesaggio storico, paesaggio culturale. Anche il paesaggio naturale può essere un bene culturale, laddove l'uomo lo ha profondamente modificato in funzione delle proprie esigenze e dunque, indirettamente, caratterizzato.

Nelle società civili i BB.CC. sono normalmente tutelati, studiati, salvaguardati, conservati, valorizzati, come espressioni irripetibili delle civiltà che ci hanno preceduto, ancorché recenti. I beni sono oggetto di fruizione, attraggono la nostra attenzione, curiosità, interesse perché diversi dalla produzione attuale; suscitano emozioni per il significato artistico che possono avere ma anche per il valore storico di cui sono testimonianza. Richiamano folle di turisti che nei nostri tempi vanno ampliandosi a dismisura, a seguito delle enormi possibilità di spostamento di persone e genti a livello globale. I beni divengono così, soprattutto in alcuni paesi, eminentemente in Italia, una risorsa economica importante.

Il presente lavoro illustra una ricognizione attraverso la quale si è cercato di individuare i benefici che possono venire alle diverse attività connesse ai BB.CC. dall'applicazione delle moderne tecnologie, con particolare attenzione al territorio milanese. Si è partiti illustrando il quadro di riferimento dei BB.CC., sia a livello generale, sia per quanto riguarda la realtà italiana. Si è cercato di chiarire i ruoli dei diversi attori coinvolti in questo settore, o perché sono gestori dei beni, o in quanto hanno competenze specialistiche di vario tipo in riferimento a essi, o perché possono favorire lo sviluppo anche economico dei BB.CC., attraverso l'innovazione tecnologica e l'applicazione delle tecnologie al settore.

Di necessità, abbiamo circoscritto il vasto dominio dei BB.CC. alla categoria dei beni di tipo materiale riferendosi, in particolare, alle *opere policrome* (dipinti su supporto mobile, affreschi), alla *statuaria* in marmo, in pietra, leghe metalliche, agli oggetti prodotti dalle cosiddette *arti minori*, per lo più conservati in musei, alle *strutture architettoniche* e ai *siti archeologici*.

2. IL SISTEMA DEI BENI CULTURALI

Rispetto ad altri settori applicativi delle moderne tecnologie, quello dei BB.CC. si presenta particolarmente complesso, soprattutto a motivo della forte disomogeneità professionale degli attori che vi operano e del carattere altamente pluri-disciplinare.

Nell'area dei BB.CC., infatti, confluiscono saperi e professionalità appartenenti a domini tra loro distanti, quali quelli umanistici (storici d'arte, archeologi, architetti), quelli scientifici (chimici, fisici, geologi, biologi, ecc.) e quelli tecnici (restauratori e altri operatori della conservazione).

Questo assetto rende difficoltoso, in primo luogo, il colloquio stesso tra le diverse categorie citate non abituate, per loro stessa formazione, a condividere i percorsi di pensiero, le motivazioni, gli obiettivi delle altre. Di questa non facile capacità di comunicazione si ridiscute puntualmente in ogni convegno, *workshop*, occasione di confronto, senza compiere sostanziali passi in avanti, salvo naturalmente importanti eccezioni. Le diversità professionali si ripercuotono anche nei ruoli.

L'Italia è notoriamente un paese a tradizione umanistica e l'area dei BB.CC. non poteva non essere prevalentemente sotto la gestione delle professioni di impostazione umanistica. Ciò è comprensibile e in generale anche ragionevole, sebbene non in ogni caso. Non si dimentichi infatti che i BB.CC. - quelli almeno a cui abbiamo detto di riferirci nel presente contesto - sono beni materiali e come tali, soggetti a tutte le condizioni e le limitazioni (di apparenza, di esistenza, di conservazione) che caratterizzano ogni realtà materiale.

La materia è oggetto di considerazione, di studio, di competenza delle scienze sperimentali, le quali, quando si occupano di BB.CC., dovrebbero godere di pari importanza di ruolo, massimamente nelle questioni di conservazione e per quanto attiene lo studio delle tecniche di realizzazione delle opere. Ciò, fermo restando che, gli aspetti di tipo storico, stilistico, della composizione, del significato culturale, dell'espressività, dell'arte, rimangono terreno di competenza, di indagine e di approfondimento delle scienze umane.

Vi è inoltre una terza componente che afferisce ai BB.CC., quella dei restauratori e degli altri soggetti che i nuovi percorsi accademici vanno gradualmente formando e connotando. La categoria professionale dei restauratori si fonda su competenze principalmente di tipo tecnico. Nell'approccio ai BB.CC. essa utilizza, più delle altre, mezzi tecnologici, materiali e procedure. Quando occorre metter mano direttamente sulle materie e sulle strutture costitutive dei beni materici, per recuperarli e conservarli, senza le conoscenze, le competenze, la manualità dei restauratori, si farebbe ben poca strada.

L'area dei BB.CC. si configura, dunque, tipicamente multi-disciplinare perché essi stessi sono portatori di realtà, valori e caratteri molteplici. Inoltre, anche all'interno di una medesima categoria disciplinare non sempre vi è piena sintonia e armonia comunicativa, come tra storici e architetti. Quando l'oggetto dei loro studi o delle loro decisioni viene a coincidere, i dispareri non mancano e le opinioni sono talvolta conflittuali. Per uno storico, ad esempio, un affresco è primariamente un dipinto, un'opera con un significato compiuto che assurge, talvolta, a capolavoro artistico. Per un architetto è una decorazione muraria, funzionale al contesto architettonico in cui è inserita e che di solito arricchisce. Analoghi conflitti, sebbene forse in misura minore, possono manifestarsi, naturalmente, anche nei contesti scientifici.

D'altra parte, occorre dire che questo aspetto della multidisciplinarietà è allo stesso tempo uno dei motivi principali del fascino singolarissimo, che motiva e appassiona coloro che operano in quest'area.

Osserviamo, per chiudere l'argomento, che laddove vi è buon senso, non solo l'integrazione è possibile ma contribuisce in modo sostanziale alla crescita delle competenze, le qualifica ulteriormente e ne crea delle nuove, a tutto vantaggio dei BB.CC. stessi.

3. GLI AMBITI DI ATTIVITÀ DEI BENI CULTURALI

Prima di affrontare l'esame dei *bisogni* di natura tecnologica di cui vi è attesa nel mondo dei BB.CC., e che possono quindi configurarsi come *driver dell'innovazione*, occorre aver chiaro il quadro degli ambiti nei quali le attività per i BB.CC. si esplicano. Questi coincidono fondamentalmente con poche aree tematiche ma ben connotate:

- Conoscenza;
- Conservazione;
- Fruizione e Valorizzazione;
- Sicurezza e Salvaguardia;
- Documentazione e Archiviazione.

Vale la pena ripercorrere il significato di queste categorie.

Conoscenza

L'area della conoscenza non è nuova né recente, poiché da sempre le opere prodotte dalle culture passate, sono state oggetto di studio, di approfondimento, di ricerca. Questo compito è stato sviluppato, tradizionalmente, dalle professioni del ramo umanistico, prima di tutto sotto il profilo storico (storia delle culture, delle scuole, degli autori), poi sotto quello dell'espressione artistica (storia degli stili, ecc.) e, in parallelo degli altri molteplici significati di cui un bene culturale è portatore (religioso, iconografico, politico e via dicendo).

Di fatto, i significati citati coincidono con quei contenuti (storici, creativi, culturali in genere) che rappresentano dei BB.CC. i valori più importanti, quelli che ci emozionano perché ci fanno accedere alla dimensione dell'arte, e che ci incuriosiscono per la distanza temporale e culturale che dai beni storici ci separa.

Tuttavia, per realizzare oggetti, monumenti, architetture storiche e quant'altro, le diverse culture antiche hanno dovuto confrontarsi con difficoltà di tipo tecnico assai notevoli, in rapporto alle conoscenze dei tempi: conoscenza dei materiali, delle loro proprietà, invenzione di nuovi materiali, superamento di difficoltà costruttive, ecc.

Spesso, le tecniche di realizzazione delle opere sono state delle vere e proprie conquiste dell'invenzione, che hanno richiesto attività progettuale e traduzione delle idee in realizzazioni concrete, manipolando materie, assemblando strutture.

A partire dagli anni '50-'60 anche le discipline scientifiche sperimentali hanno iniziato a interessarsi con sistematicità alle opere antiche, aprendo nuovi importantissimi orizzonti di *conoscenza*, proprio in riferimento agli aspetti legati alla loro matericità. L'Archeologia è stata la prima a coinvolgere competenze scientifiche, per cercare di datare o stabilire la provenienza di reperti o di antichi insediamenti, al di là degli stili e delle collocazioni topografiche e stratigrafiche. Quelle applicazioni scientifiche, inizialmente solo episodiche, sono gradualmente confluite nella nuova disciplina dell'*Archeometria*.

Gli studi sulla *provenienza* (attribuzione a una cultura/civiltà), della *datazione* (identificazione di un riferimento temporale) e della *attribuzione* (riconoscimento dell'autore o della scuola), hanno fortemente beneficiato delle grandi possibilità messe a disposizione dalle indagini scientifiche e dai mezzi tecnologici di cui queste si avvalgono, operando, ovviamente, in stretta collaborazione con l'indagine storica.

Lo *studio delle tecniche di esecuzione*, in precedenza trascurato o sottovalutato, è divenuto oggetto di specifica attenzione, portando alla luce una quantità di soluzioni che altro non possiamo definire se non tecnologiche, una tecnologia del passato, mirabilmente al servizio dell'arte e dell'espressione.

Conservazione

Da subito, in parallelo all'approfondimento della conoscenza delle opere antiche, è nata l'esigenza di conservarle. Questa attività è stata tradizionalmente sviluppata dai restauratori. Essi hanno selezionato via via *procedimenti* e *materiali* per il *restauro* che sono sembrati meglio rispondere al difficile obiettivo di prolungare l'esistenza di manufatti e monumenti, preservandone i valori espressivi. Dagli stessi anni '50-'60 sopra citati, anche nell'ambito della conservazione le scienze sperimentali hanno iniziato a fare il loro ingresso, con un contributo in continua crescita che si è rilevato eccezionale e determinante. È nata infatti una seconda disciplina scientifica dedicata ai BB.CC.: la *Scienza della Conservazione*. Per la prima volta, si è iniziato a studiare su basi scientifiche, con strumenti sofisticati di indagine e di analisi, i processi di degrado che interessano manufatti e monumenti, riuscendo a diagnosticare le patologie delle opere (cosiddetto *stato di conservazione*) e, parallelamente, individuando, selezionando e sperimentando *nuovi materiali e metodi di restauro*. Questo processo è avvenuto con progressiva accelerazione negli anni '90 e continua con lo stesso *trend* nell'attuale scorcio del 2000.

Col tempo, in parallelo al *restauro* (intervento sulle opere), si è venuto a delineare un approccio diverso, che perfeziona le strategie di conservazione: la *conservazione preventiva* (intervento sugli ambienti di conservazione o sulle strutture a contorno di un'opera per contenere le cause del degrado). Anche questa disciplina si è avvalsa e si avvale di soluzioni tecnologiche, utilizzando in gran parte le conoscenze sviluppate nel campo dell'impiantistica per condizionare il clima e depurare l'atmosfera degli ambienti di conservazione soprattutto dagli inquinanti atmosferici (gas acidi e polveri). Oggi sta prendendo campo un'ulteriore prassi di conservazione: la *manutenzione programmata*, meno invasiva del restauro, ma a lungo andare non meno efficace.

L'insieme di questi diversi approcci alla conservazione richiede tuttavia uno strumento cruciale di valutazione: il *monitoraggio*. Esso consente di conoscere e quantificare la *progressione del degrado*, l'*evoluzione dell'impatto delle cause*, la *durabilità dei trattamenti* nel tempo. Nel monitoraggio è implicita una varietà e una quantità di sistemi tecnologici che per larga parte sono ancora da sviluppare.

Occorre mettere in evidenza che, almeno finora, è stata più la scienza, che la tecnologia, a fare il suo ingresso nei BB.CC., e ciò è avvenuto fondamentalmente per iniziativa del mondo scientifico (Università, CNR, ENEA, ecc.) piuttosto che del mondo umanistico. In altre parole, la molla che ha agito da motore per sviluppare discipline specialistiche, come le Scienze Archeometriche e la Scienza della Conservazione, è riconducibile alla curiosità degli scienziati per questo settore, salvo, naturalmente, importanti eccezioni. Queste hanno riguardato, soprattutto, i grandi Istituti di restauro del Ministero per i BB.CC., primo in senso temporale, l'Istituto Centrale per il Restauro (ICR) con sede a Roma. Già dagli anni '40-'50, Cesare Brandi, fondatore e primo direttore dell'ICR, prevede in tempi assai precoci, esperti e laboratori scientifici per il suo istituto. Più tardi, nel '75, Umberto Baldini, fondatore e primo direttore dell'Opificio delle Pietre Dure di Firenze, fece altrettanto per il nuovo istituto.

Dal mondo dei BB.CC., quindi, e principalmente nell'ambito della conservazione e del restauro - il più avanzato verso la sponda tecnologica, che si è avvertita l'esigenza di competenze scientifiche e applicazioni tecnologiche.

Fruizione e Valorizzazione

Si tratta di due aree tematiche strettamente interconnesse. Per secoli confinata in ambiti ristretti, praticamente coincidenti con le collezioni private, la *Fruizione* dei BB.CC., è cominciata a crescere, prima, con l'istituzione delle collezioni di pubblico accesso, ovvero i musei, poi, quando la gente ha iniziato a spostarsi dai propri luoghi di origine - e non solo per motivi di lavoro - verso città

diverse, paesi diversi, con il fenomeno del turismo. Via via che le possibilità di mobilità venivano ad aumentare, il turismo in parallelo cresceva, mettendo alla portata di una quantità di persone il patrimonio di altre civiltà, altri siti, lontani dai propri luoghi di provenienza, di fatto acquisendo un forte carattere anche culturale. Nel groviglio complesso di interessi della società moderna, i BB.CC. sono venuti a occupare un posto importante. I media hanno cominciato a occuparsene con sistematicità: giornali e TV hanno nei loro palinsesti la pagina culturale e questa, molto spesso, è dedicata ai BB.CC. (grandi restauri, recensioni su famose opere, artisti, ecc.). Le mostre di pittura, di scultura e di arti minori si sono moltiplicate. Ma è negli ultimi decenni, e in particolare in quest'ultimo, con l'arrivo di un numero sempre maggiore di turisti-potenziali-fruitori, da paesi come il Giappone, l'Europa dell'Est, e ora la Cina e l'India, che il turismo culturale ha assunto e sempre più assume il carattere di fenomeno di massa (*turismo di massa*, appunto), raggiungendo livelli di incredibile portata e identificandosi, più ancora che in un recente passato, come obiettivo economico di grande rilievo.

Il processo descritto ha fatto sì che della fruizione sia stato privilegiato prevalentemente l'aspetto quantitativo: *accesso quanto più numeroso* ai BB.CC.. Se da una parte ciò è comprensibile, poiché risponde alla esigenza primaria di favorire l'aspetto della ricaduta economica, occorre osservare che sotto il profilo della qualità, si è registrato invece un'inversione di tendenza, nel senso, soprattutto, di una fruizione meno gratificante. Basti osservare, al proposito, le code interminabili di turisti, per ore in attesa di accedere ai grandi musei, ai monumenti famosi, che sembrano celebrare un rito dovuto (così fan tutti) ma poco partecipato. Il processo di fruizione ha certamente una sua soglia di tolleranza, oltre la quale è prevedibile che subentrino fenomeni di saturazione. Entra in gioco, a questo punto, una diversa categoria dei BB.CC., la *Valorizzazione* che, come abbiamo detto, è fortemente connessa alla fruizione. Il termine *Valorizzazione* non è certo nuovo ma il suo ingresso nei BB.CC. è relativamente recente. In quest'ambito, è una espressione utilizzata e recepita in maniera diversa a seconda dei contesti. Alcuni la intendono come '*gestione finalizzata a migliorare il target economico*', ma sarebbe una dimensione riduttiva. Che i BB.CC. possano divenire fonte sempre più rilevante di risorse economiche è senz'altro vero ma non è questo né il significato né l'obiettivo più diretto della valorizzazione. A livello più generale, l'espressione '*valorizzare*' è per lo più intesa come '*creare valore aggiunto rispetto ai valori intrinseci di un qualche bene*'. I BB.CC., tuttavia, sono tra gli oggetti più ricchi di valori. Nell'immaginario collettivo essi, da sempre, identificano valori artistici, storici, religiosi e altri. In apparenza sembrerebbe non vi sia motivo di *valorizzarli*. Nella pratica, però, molti di questi valori risultano di difficile ricezione da parte di chi non è preparato per propria cultura o sensibilità, con il risultato di rimanere quasi o del tutto inaccessibili. Se attraverso strumenti idonei, discreti ma efficaci, si agevola il fruitore a percepire, nei brevi tempi della sua visita o della sua attenzione, valori non espliciti o non immediati, che ne catturino l'interesse, suscitino l'emozione, la partecipazione, si fa opera di *valorizzazione* a favore di una *fruizione* più partecipativa ed emozionale, e di riflesso, si influisce sul ritorno economico connesso ai BB.CC..

Sicurezza e Salvaguardia

Anche per queste due categorie sussistono aspetti comuni. In entrambi i casi le attività sono rivolte a individuare e realizzare provvedimenti verso possibili rischi che il Patrimonio Culturale può correre. La *Sicurezza* (*Security*) è intesa soprattutto nei confronti di quei rischi che hanno origine da atti intenzionali diretti, e quindi soprattutto *furti*, *atti vandalici*, *guerre*. Il problema della sicurezza è probabilmente sempre esistito, e in particolare per quei beni che sono situati in luoghi pubblici, all'aperto, accessibili a soggetti non proprietari. Questo dato è quasi sempre vero ma è altrettanto vero che i beni sono in prevalenza inamovibili. Nelle chiese e nei luoghi di

culto in genere, l'eventualità di furti è, presumibilmente da sempre, un problema. Col nascere di musei, palazzi pubblici e siti simili, il problema si è certamente ingigantito ed è stato affrontato, tradizionalmente, con l'utilizzo di personale di custodia, di transenne, schermature in vetro, ecc., ma anche di teche e vetrine (le quali hanno tuttavia anche intenti diversi). Solo oggi, con lo sviluppo soprattutto delle tecnologie elettroniche, si apre un ventaglio di possibilità nuove e sicuramente più agguerrite.

La *Salvaguardia (Safety)* del Patrimonio fa invece riferimento ai danni che possono provenire da cause non intenzionali o non direttamente intenzionali: da *eventi catastrofici* quali terremoti e alluvioni, dal *trasporto di opere* in sedi diverse dalle originali, per mostre, ecc.. Verso gli eventi catastrofici l'atteggiamento è stato fino a tempi recenti praticamente passivo. Nell'ultimo decennio vanno sviluppandosi nei diversi paesi *carte o mappe del rischio*. In Italia è l'Istituto Centrale per il Restauro a occuparsene, con l'obiettivo di quantificare la probabilità di rischio in funzione dell'ubicazione del bene. In tal senso, oltre agli eventi catastrofici, viene preso in considerazione, ovviamente, anche l'impatto del clima e dell'inquinamento sul Patrimonio. L'obiettivo della salvaguardia è diverso da quello della conservazione preventiva, con la quale si tenta di applicare rimedi (controllo del clima negli ambienti confinati, applicazione di protettivi o ripari per il patrimonio all'aperto), è quello di *segnalare lo stato di allarme* prima del superamento della soglia di rischio, oltre la quale gli effetti risulterebbero irreversibili. È ovvio che anche in quest'ambito è soprattutto da oggi, ovvero dallo sviluppo delle tecnologie elettroniche e informatiche, che si aprono nuove concrete possibilità.

Documentazione e Archiviazione

L'esigenza di catalogare, documentare e tenere archivi del patrimonio culturale materiale che un ente proprietario possiede (lo Stato, l'ente locale, la Chiesa, il privato) è esistita probabilmente da sempre. Nei tempi antichi, quando non si disponeva di riproduzioni oggettive delle immagini delle opere, gli archivi sono consistiti essenzialmente in descrizioni testuali di esse e della loro collocazione. Con lo sviluppo della fotografia, documento oggettivo di riproduzione dell'immagine, il compito di catalogare, documentare, tenere archivi del Patrimonio è divenuto decisamente più affidabile e importante. Questo compito, come è noto, risponde a più esigenze quali, ad esempio, quella di disporre di un elenco dettagliato di ciò che si possiede, anche in riferimento alla possibilità di furti o eventi catastrofici, quella di rendere accessibile agli studiosi l'elenco degli oggetti che fanno parte di una collezione o le opere raccolte in un edificio storico, ecc.. Per il Patrimonio pubblico, l'esigenza di catalogazione e archiviazione corrisponde a un preciso dovere civico.

Tre sono state le rivoluzioni tecnologiche che hanno modificato in maniera sostanziale la realizzazione di archivi documentari nei BB.CC.: la fotografia tradizionale, come già detto, la fotografia digitale e gli strumenti informatici per l'archiviazione, ossia i data-base. Si può facilmente immaginare come gli ultimi due strumenti informatici citati abbiano potenziato in maniera sorprendente l'organizzazione stessa degli archivi, la ricchezza di informazioni che è possibile inserirvi, l'accessibilità degli utenti a essi, le possibilità di ricerca e di confronti. È un settore nel quale, a ragione, si può sostenere che l'apporto delle moderne tecnologie ha fatto fare un passo in avanti gigantesco.

4. I DRIVER DELL'INNOVAZIONE

Oggi, nei vari ambiti di attività che caratterizzano i BB.CC., si registrano chiari segnali di una forte attesa di innovazione attraverso l'utilizzo delle moderne tecnologie. In effetti, pressoché tutte le attività tipiche dei BB.CC. potrebbero trarre concreti e sostanziali vantaggi

dalle nuove acquisizioni tecnologiche, sebbene, per alcune, questo processo sembra essere più immediato. Tali sono, ad esempio, i settori della Fruizione e Valorizzazione, della Salvaguardia e Sicurezza e della Documentazione e Archiviazione. I primi (Fruizione e Valorizzazione) e gli ultimi (Documentazione e Archiviazione) richiamano immediatamente, per esempio, l'utilizzo delle tecnologie informatiche e di telecomunicazione (ICT). Quanto ai secondi (Salvaguardia e Sicurezza), è facile pensare all'impiego proficuo di una sensoristica capace di segnalare per tempo stati di rischio di natura diversa per il Patrimonio.

Ma andiamo con ordine, partendo dall'area della *Conoscenza*. Nei paragrafi precedenti, abbiamo già messo bene in evidenza come questo settore abbia tratto vantaggi insostituibili dall'utilizzo delle moderne tecniche di indagine archeometrica, capaci di datare reperti, identificare materiali, ricostruire tecniche di esecuzione dei manufatti o *iter* progettuali per la realizzazione di edifici, complessi architettonici, centri urbani e quant'altro. È vero tuttavia che l'esigenza di approfondire le conoscenze in quest'ambito non ha praticamente limiti. L'attività delle civiltà umane succedutesi nei secoli e millenni passati è stata così vasta e diversificata da ritenere, ragionevolmente, che quanto è stato finora scoperto rappresenti solo una piccola parte di quanto ancora vi è da scoprire.

Per questo, più sofisticati e precisi si faranno i mezzi scientifici d'indagine a disposizione del settore, più la conoscenza ne trarrà vantaggio in certezze e numero di informazioni. Gli archeologi senz'altro, ma anche gli architetti, e più recentemente, gli storici dell'arte, hanno appreso quanto sia cruciale il contributo scientifico alla conoscenza del Patrimonio Culturale, che si realizza, appunto, grazie all'impiego di strumentazioni tecnologicamente sempre più avanzate. Non si pensi soltanto all'opera di ricostruzione delle realtà composizionali e costruttive di un bene, ma anche alla localizzazione di beni ancora nascosti in ambienti ipogei, sottomarini, ecc.; si pensi ai mezzi per fornire sempre maggiore certezza ai problemi di provenienza e attribuzione. È notizia recentissima la revisione della datazione della Sacra Sindone alla luce di indagini tecnologicamente più avanzate.

Ciò nulla toglie, ovviamente, alla centralità degli studi d'impronta storico/umanistica, i quali anzi, si integrano vicendevolmente, nell'opera di conoscenza, con quelli scientifico/tecnologici, secondo un tipico approccio pluridisciplinare e interdisciplinare.

A maggior ragione, l'area della *Conservazione* è passibile di risultati innovativi che possono venire dall'applicazione delle conoscenze tecnologiche oggi disponibili. Per il restauro ciò è immediatamente evidente. Sappiamo bene quanto i materiali e i procedimenti d'intervento disponibili siano ancora lontani da soddisfare le molteplici esigenze. L'innovazione non solo sarebbe benvenuta ma, sicuramente attesa con grandi aspettative di nuovi più appropriati materiali di restauro, di nuove procedure d'intervento più selettive e meno invasive. Quanto alle tecniche diagnostiche per lo studio del degrado delle opere valgono le considerazioni già fatte per le tecniche archeometriche. Più precise, sensibili e minimamente invasive potranno essere le tecniche d'indagine, più veritiere saranno le informazioni sull'effettivo stato di conservazione di un manufatto o monumento (diagnosi del degrado). Sul fronte della conservazione preventiva, vi è forte attesa, in ambito museale, di metodi efficienti e compatibili con le esigenze della fruizione di massa per minimizzare l'impatto dell'ambiente (inquinanti, polveri, effetti della temperatura e dell'umidità) sulle opere esposte. Ma ancora maggiore è l'attesa per l'attività di monitoraggio che è, come già si è detto, in larga parte da implementare. E qui la tecnologia può giocare un ruolo prezioso.

Tornando ora alle aree della *Fruizione* e della *Valorizzazione* cui abbiamo già sopra accennato, viene da chiedersi, se sia utile persistere in politiche che concorrano a favorire l'ulteriore incontrollato aumento di una fruizione poco partecipativa o convenga invece spostare l'asse verso la ricerca di un sostenibile equilibrio tra quantità e qualità. In particolare nei grandi musei, il turista arriva spesso già esausto davanti alle opere-immagini-cartolina, incapace di recepirne il messaggio culturale e

semantico, se non in maniera passiva e fugace. Anche quando si tratta di un visitatore ricettivo e appassionato, poche sono le informazioni che gli vengono offerte sull'opera oggetto del suo interesse: nella maggior parte dei casi si trova di fronte una targhetta con scarse informazioni sul nome, sull'autore e sulla cronologia del manufatto. Se è più fortunato, può trovare pannelli esplicativi i quali però, troppo spesso, soffrono di carenza comunicativa o addirittura di pedanteria.

Non a caso, a contrastare queste carenze, già si è iniziato a mettere in atto politiche e mezzi, anche tecnologici per l'appunto, per migliorare la qualità della fruizione, trasformandola da passiva in attiva e interattiva. Da alcuni anni, infatti, tecnologie multimediali di varia natura stanno entrando nel mondo dei BB.CC., al fine di rendere più facile la ricezione dei valori di cui sono portatori, ovvero valorizzandoli, per rendere più partecipativa la fruizione. È in questa direzione che occorre muoversi.

E venendo alla *Salvaguardia* e alla *Sicurezza*, come già si è anticipato, si tratta di aree che stanno trovando sviluppo soprattutto in tempi recenti, proprio grazie alla disponibilità enormemente maggiore di strumenti tecnologici che consentono, a costi anche contenuti, di affrontare i problemi delle due cruciali tematiche, in maniera, se non ancora risolutiva, senza dubbio assai più efficace rispetto a quanto è stato fatto finora. È il campo della sensoristica elettronica, soprattutto, che può venire incontro ai bisogni e che, naturalmente, occorre specializzare per le esigenze dei BB.CC..

Considerazioni del tutto analoghe valgono per *Documentazione* e *Archiviazione* per le quali abbiamo già messo in evidenza l'effetto innovativo e straordinario determinato dall'avvento della fotografia digitale e dei data-base informatici. Considerata la tendenza di crescente e rapidissimo sviluppo di questi strumenti, è facilmente prevedibile il progresso che c'è da aspettarsi per queste categorie di attività.

5. STRATEGIE PER LA DIFFUSIONE DELLE NUOVE TECNOLOGIE NEL SISTEMA DEI BENI CULTURALI

A fronte del quadro di riferimento che abbiamo cercato di illustrare nei paragrafi precedenti, nel quale sono state messe in evidenza le diverse categorie di attività dei BB.CC., la varietà e diversità degli attori che vi operano, i loro ruoli e la complessità dei rapporti che legano tra loro le varie figure professionali, appare evidente che l'adozione di linee strategiche tradizionali per favorire l'ingresso delle nuove tecnologie in quest'area avrebbe scarse possibilità di successo. Occorre adottare percorsi *ad hoc*.

Partiamo innanzitutto dall'assunto che ogni attività connessa ai BB.CC. è per propria natura multi-disciplinare. Di ciò dobbiamo tener conto nell'avviare un qualsivoglia progetto di trasferimento tecnologico: dall'idea, alla produzione, alla commercializzazione.

In quest'ultimo decennio va delineandosi, anche per i BB.CC., una sorta di filiera. Essa si profila già sufficientemente capiente da accogliere proposte innovative importanti. In apparenza, sembrerebbe quindi non difficile individuare linee di innovazione concretamente realizzabili. I problemi, tuttavia, possono essere incontrati nei *tempi*, nei *modi* e nei *coinvolgimenti*.

Quanto ai *tempi*, la prima condizione da rispettare è la gradualità. Nei BB.CC. non si può agire in maniera eccessivamente frettolosa, come si è abituati per altri settori. Il contesto non è ancora completamente maturo per accogliere *tout court* tecniche e sistemi innovativi, senza essere prima adeguatamente preparato. Da parte della componente umanistica vige un atteggiamento critico e di prudenza. Ciò è vero, soprattutto, per quanto riguarda gli storici d'arte e in minor misura gli archeologi. Gli architetti, invece, sono in generale più ricettivi verso proposte d'innovazione, ma a loro modo essi stessi critici.

Veniamo ora ai *modi*. L'inerzia che spesso si registra verso l'innovazione non è solo dovuta

a una istintiva prudenza nel senso cui si diceva sopra, ma anche alla consapevolezza, da parte di funzionari e dirigenti di Soprintendenze ed Enti locali, di una cronica mancanza di risorse nell'ambito delle strutture pubbliche. Questa condizione di sofferenza economica viene superata, tuttavia, in alcune speciali occasioni quali, ad esempio, le mostre. Come è noto, le mostre sono eventi culturali di grande visibilità, nei quali, grazie a sponsor privati o a finanziamenti pubblici speciali, si determina una disponibilità di risorse superiore rispetto alla norma, associata a una forte motivazione di richiamare l'attenzione. Le due condizioni fanno sì che, l'evento delle mostre, soprattutto delle grandi mostre, offra la situazione ideale per accogliere e promuovere tecnologie innovative: una sorta di occasione pilota. Di ciò, occorre tener conto, nelle scelte strategiche.

E infine i *coinvolgimenti*. In operazioni classiche di trasferimento tecnologico i soggetti coinvolti sono normalmente due: coloro che sviluppano ricerca, da una parte, e le aziende produttrici di tecnologia, dall'altra. In Italia, come è noto, l'attività di ricerca in ambito aziendale, e particolarmente nelle PMI, è generalmente limitata. Sono quindi soprattutto gli enti scientifici, Università, CNR, ENEA, ecc. ad assicurare il necessario processo di indagini a monte dell'innovazione.

Nel mondo dei BB.CC. la situazione è più complessa. Se non viene coinvolta la terza tipologia di soggetti, ovvero gli enti della tutela (funzionari di Soprintendenze ed Enti locali detentori di beni) difficilmente l'operazione avrà successo. In assenza del terzo soggetto, l'iniziativa a due può senz'altro partire e arrivare a realizzazioni valide, le quali tuttavia, avranno verosimilmente vita breve, risulteranno episodiche: in pratica se ne venderanno poche. È dunque strategicamente fondamentale rispettare questa terza condizione che consiste nel coinvolgere, fino dall'inizio di un progetto, gli attori dei BB.CC., cercando di sensibilizzarli sull'opportunità, sulla convenienza e sul vantaggio dell'operazione, ricercandone i consigli e i suggerimenti.

6. LE TIPOLOGIE AZIENDALI INTERESSATE AL SETTORE

Sgombriamo subito il campo dicendo che aziende dedicate in maniera sistematica e deliberata alla realizzazione di tecnologia nei BB.CC., al momento, non esistono, o si contano sulle dita di una mano. Ciò è una realtà di cui occorre prendere atto. La complessità del sistema, l'atteggiamento prudente degli attori, il mercato potenziale non particolarmente vasto e la generale assenza di risorse sicure e sistematiche nel settore, hanno finora ostacolato lo sviluppo di aziende specializzate per i BB.CC..

La situazione tuttavia può cambiare e sta cambiando. Come già fatto notare, settori sicuramente pilota, in tal senso, sono quelli della Fruizione e Valorizzazione, della Sicurezza e Salvaguardia e della Documentazione e Archiviazione. Si tratta infatti di aree di attività relativamente recenti rispetto alle altre e proprio per questo più suscettibili di recepire l'innovazione. D'altra parte sono anche settori che meglio si prestano, per propria natura, ad accogliere i contributi delle nuove tecnologie informatiche, elettroniche e delle telecomunicazioni. Vi è poi un terzo fattore da considerare: queste aree tecnologiche, più di altre, consentono di realizzare strumenti e tecniche innovative a costi relativamente contenuti, semplicemente perché in larga parte già implementati per altre diverse applicazioni.

Sono dunque questi tipi di imprese che verosimilmente, prima di altre, potranno mostrare interesse più che episodico, per i BB.CC.. Occorre tuttavia pensare a eventi che consentano di far conoscere alle imprese questo potenziale mercato. Come infatti esiste prudenza da parte del mondo dei BB.CC. all'innovazione tecnologica, così esiste prevenzione da parte delle aziende ad aprirsi a questo settore, ritenuto, a torto, distante e sospetto (purtroppo a ragione) di essere scarso di risorse. Ma i fenomeni vanno innescati e gli eventi di *brokerage* appaiono lo strumento ideale per promuovere questo processo.

PARTE SECONDA

LE PRINCIPALI AREE TECNOLOGICHE PER I BENI CULTURALI

7. LE AREE TECNOLOGICHE DEL CICLO DEI BENI CULTURALI

La seconda parte del documento prende in considerazione le aree tecnologiche dei BB.CC., che risultano, a livello generale, di maggiore interesse per uno sviluppo tecnologico.

Per introdurre l'argomento si è ritenuto utile inquadrare in una tabella (Tabella 1) i sotto-insiemi (seconda e terza colonna) delle categorie di attività (prima colonna) che abbiamo illustrato nella prima parte. Ciò facilita la comprensione del quadro generale del sistema tecnologico dei BB.CC. e consente di referenziare le potenzialità di innovazione di processi e prodotti (materiali, strumentazioni, ecc.) conseguibili attraverso adeguate linee di ricerca e sviluppo.

Tabella 1 - Classificazione delle aree di attività passibili di sviluppo tecnologico		
Conoscenza	Indagini archeometriche [ricognizione (di siti e oggetti), datazione (epoca), provenienza (cultura), attribuzione (autore, scuola), connotazione (materiali costitutivi, tecniche di esecuzione)]	Datazione
		Strumentazioni non invasive
		Strumentazioni microdistruttive
Conservazione	Indagini diagnostiche (studio dello stato di conservazione, studio dei passati interventi, valutazione dei trattamenti)	Strumentazioni non invasive
		Strumentazioni microdistruttive
	Restauro	Prodotti
		Procedimenti (chimici, fisici, biologici)
	Conservazione preventiva	Impianti di condizionamento
		Impianti per la protezione dalle polveri
		Vetrine di esposizione <i>(entrano anche nella valorizzazione)</i>
		Sistemi informativi per la mappatura del degrado e degli interventi pregressi
	Monitoraggio	Strumentazione per il monitoraggio ambientale
		Strumentazione per la misura delle progressione del degrado
		Strumentazione per la misura delle durabilità dei trattamenti
Fruizione valorizzazione	Metodologie multimediali (ICT)	
	Illuminotecnica	

Sicurezza	Contro furti	Sistemi identificativi delle opere
		Sistemi di sorveglianza e di allarme
	Contro atti vandalici	Sistemi di sorveglianza
		Trattamenti contro i danni da graffiti
Salvaguardia	Contro il degrado ambientale	Sensoristica di allarme
	Contro eventi catastrofici	Sensoristica di allarme
		Sistemi automatici di salvaguardia
		Sistemi informativi per la mappatura del rischio
	Contro danni da trasporto	Contenitori di sicurezza per il trasporto
		Sistemi di monitoraggio durante il trasporto
Documentazione archiviazione	Sistemi di imaging digitale	
	Data-base e software di gestione e accesso	

Tra le molteplici, diverse aree tecnologiche implicite nei sottoinsiemi della tabella precedente, sono state selezionate le seguenti:

- strumentazioni non invasive e micro-distruttive per indagini archeometriche e indagini diagnostiche;
- materiali e metodi per il restauro;
- tecnologie di monitoraggio;
- tecnologie di digitalizzazione delle immagini bidimensionali;
- sistemi di climatizzazione e di controllo della qualità dell'aria in ambienti museali;
- vetrine di esposizione museali;
- tecniche di illuminazione nei BB.CC.;
- sensoristica per sicurezza e salvaguardia;
- tecnologie ICT per i BB.CC.;

8. STRUMENTAZIONI NON INVASIVE E MICRO-DISTRUTTIVE PER INDAGINI ARCHEOMETRICHE E INDAGINI DIAGNOSTICHE

Significato ed evoluzione tecnologica delle indagini diagnostiche e archeometriche

Nel quadro introduttivo l'argomento delle indagini archeometriche e diagnostiche è stato introdotto a livello generale. Si è voluto ben sottolineare la distinzione tra i due domini (archeometria e diagnostica), perché gli obiettivi che le due categorie di indagini si prefiggono sono nettamente diversi, sebbene le tecniche utilizzate siano spesso simili o addirittura le stesse. È per questa ragione, infatti, che da sempre si è generata confusione concettuale, anche tra gli stessi esperti. Ricordiamo, dunque, una volta ancora, che le *indagini archeometriche* hanno per obiettivo lo studio degli oggetti materiali per quanto attiene la loro origine, provenienza, costituzione strutturale e materiale, mentre le *indagini diagnostiche* studiano le 'patologie' dei manufatti, ossia le loro alterazioni, i prodotti di degrado e i processi che li hanno generati. Le indagini archeometriche, infatti, afferiscono alla categoria della *conoscenza*, mentre quelle diagnostiche, a quella della *conservazione*.

Nella sua globalità, il tema delle indagini per i BB.CC. è comprensibilmente vastissimo. La curiosità degli scienziati, anche non esperti del settore, di esplorare a fondo attraverso i mezzi che la scienza moderna ha messo a disposizione, i materiali costitutivi e le tecniche di esecuzione di manufatti e monumenti antichi, ha stimolato negli ultimi cinquanta anni l'impiego di ogni possibile metodica scientifica d'indagine per i BB.CC. È stata utilizzata praticamente ogni tecnica

disponibile in altri settori della ricerca, in campo ottico, fisico, chimico, geologico, biologico. Oggi, le tecniche sopravvissute nei BB.CC., divenute quotidiane, non sono poi moltissime, mentre la maggior parte di quelle che hanno avuto un impiego esplorativo, 'di nicchia', sono scomparse o tornano in gioco solo episodicamente, per problemi molto particolari.

Al di là della distinzione per obiettivi, le tecniche d'indagine si dividono in due grandi categorie, secondo un criterio che ha stretta attinenza proprio con i BB.CC., oggetti unici e irripetibili: quelle *non invasive*, e quelle che si eseguono su campioni prelevati dalle opere, oggi definite *micro-distruttive*. Sotto questo aspetto, ciò che fa la sostanziale differenza è proprio l'operare o meno su un prelievo. Il campione implica un danno intenzionale, microscopico quanto si vuole, ma pur sempre una menomazione che, se riguarda oggetti caratterizzati da unicità, è obbligatoriamente da limitare al massimo. Ci si chiederà, allora, perché si continua a fare indagini micro-distruttive.

La risposta è una sola: nessun tipo d'indagine non invasiva è capace, per il momento, di fornire le informazioni che si possono acquisire attraverso gli esami condotti su un campione prelevato da un'opera, soprattutto riguardo agli strati interni del manufatto, posti al di sotto della superficie, che hanno tanta importanza sia nella diagnostica che nell'archeometria. Per contro, le indagini micro-distruttive hanno il limite di fornire informazioni solo relative al punto di prelievo; né d'altra parte, come si è detto, si possono eseguire prelievi a volontà, ancorché piccoli. Le indagini non invasive, dunque, meno informative delle altre, hanno però il vantaggio di mettere a disposizione informazioni a carattere panoramico, distribuite sull'oggetto, ben relazionabili con le strutture del manufatto che direttamente si osservano: una campitura cromatica, un tipo di pietra, una patina di corrosione, una crosta nera, una formazione biologica, un viraggio di colore, una macchia, ecc.

È comprensibile quindi che i due tipi di indagini non siano alternative ma integrative. E ciò spiega il permanere di entrambe nella pratica operativa. Nella strategia dei piani di indagine, di solito, si dà la precedenza ai metodi non invasivi, che forniscono una panoramica generale sulle diversità materiche di un'opera o di una sua parte, e al contempo indirizzano sui punti di prelievo dei campioni (se necessari), facendo poi seguire le indagini micro-distruttive che circostanziano e connotano quanto dalle prime era stato messo in evidenza. Ciò premesso, è conveniente ramificare ulteriormente la classificazione.

Le tecniche non invasive, infatti, si distinguono in *puntuali*, come lo sono le micro-distruttive ma con il vantaggio, essendo non invasive, di poter essere ripetute per tutti i punti del manufatto che si ritengono utili, e di *imaging*, dove la dizione inglese indica che il risultato dell'indagine è appunto un'immagine, ovviamente diversa da quella normalmente visibile, che porta informazioni nuove e aggiuntive rispetto a questa. Le tecniche di *imaging* si basano ovviamente quasi tutte su fenomeni ottici o, più precisamente, sulle interazioni delle radiazioni elettromagnetiche con la materia. In maniera parallela, anche le tecniche micro-distruttive si articolano in due sottocategorie: *su campione* o *su sezioni* del campione. Le prime utilizzano il campione nel suo insieme e danno precise informazioni sulla sua composizione globale, indipendentemente dalle strutture che può contenere. Le seconde, su sezione, consentono l'esplorazione sistematica delle stratificazioni interne del campione, poste al di sotto della superficie e quindi invisibili a occhio (che poi sono le strutture del manufatto, nel punto di prelievo). Aggiungiamo subito che le 'tecniche su sezione' sono estremamente informative e spesso insostituibili, proprio in quanto molti manufatti antichi hanno strutture micro-stratificate (ad esempio i dipinti) e molte manifestazioni di alterazione e di degrado, sviluppatasi per impatto dell'oggetto con il mondo esterno, hanno anche strutture a strati. E aggiungiamo ancora che anche i materiali dei precedenti interventi di restauro, che è molto importante caratterizzare negli studi diagnostici, provenendo dall'esterno sono distribuiti nel senso ortogonale alla superficie (una pulitura, una protezione, un consolidamento, un ritocco, ecc.). È di grande importanza aver chiaro questo inquadramento delle tecniche per comprendere le

necessità del settore e, come si vedrà più avanti, i limiti e i *target* di innovazione che ci si attende dalla ricerca e dallo sviluppo tecnologico.

L'applicazione dei metodi d'indagine ai BB.CC. si è sviluppata, storicamente, a opera di docenti universitari e ricercatori, che avevano ideato o erano familiari con tecniche particolari, e che hanno ritenuto interessante esplorarne l'applicazione anche nel suggestivo mondo delle opere d'arte. Tra le prime tecniche è, ad esempio, da ricordare la *radiografia* ('tecnica non invasiva per *imaging*'), che consentiva, per la prima volta nella storia (siamo agli inizi degli anni '20), di 'vedere attraverso i dipinti', discriminare le loro strutture interne, ad esempio, nelle tavole, i chiodi, i perni, la gallerie dei tarli, ma anche la presenza di pigmenti radio-opachi, a peso atomico elevato, primo fra tutti, onnipresente, il bianco di piombo, usato in pittura sin dal IV secolo a.C. e fino a due decenni fa.

Con la radiografia si esploravano anche piccoli oggetti archeologici, bronzetti, statuette in marmo o terracotta, per studiarne le saldature, i tasselli di integrazione, le imperniature, ecc.: una tecnica indubbiamente suggestiva, tanto più se rapportata ai tempi, ma assolutamente indispensabile oggi. Negli ultimi decenni è stata assai migliorata nella qualità grazie alla calibrazione precisa dell'esposizione ai raggi, all'uniformità di esposizione, alla definizione e alla possibilità, ora, di digitalizzare le riprese ed esaminarle con cura, ingrandite, sul monitor di un computer, rilevando dettagli in precedenza difficilmente distinguibili.

Altra tecnica storica è la *microscopia ottica*, che può essere sia '*non invasiva per imaging*', per esaminare direttamente gli oggetti e i loro dettagli al microscopio o '*micro-distruttiva su campione*', per penetrare nei dettagli costruttivi degli oggetti, per estrarre dati sull'identità, la provenienza, l'origine, ma anche per iniziare a studiare il degrado, le alterazioni, a prender visione dei problemi di conservazione in termini scientifici. Oggi, la microscopia ottica è particolarmente impiegata su '*campioni in sezione*'. È la tecnica-principe per lo studio stratigrafico delle superfici (policromie originali, ridipinture, dorature, patine naturali, incrostazioni da sali, strati di corrosione nei bronzi, fibre tessili, specie lignee, formazioni microbiologiche, ecc.). Nel frattempo si è potentemente arricchita di potenti dispositivi ausiliari per gli *esami in ultravioletto* (fluorescenza U.V.) e nel *vicino infrarosso*. La fluorescenza U.V., in particolare, è tecnica capace di mettere in luce, in una sezione, la distribuzione stratigrafica dei materiali organici trasparenti e poco colorati, come le vernici, i film di adesivi, i protettivi, i leganti pittorici, ecc., per lo più fluorescenti, perché invecchiati (l'invecchiamento infatti intensifica gli effetti di fluorescenza). In tempi successivi si sono rese disponibili altre potenti tecniche non invasive di *imaging*, quali la *Fluorescenza U.V.* e l'*Infrarosso*. Inizialmente, quando la fotografia era ancora ai primordi, si trattava di riprese in bianco e nero, ma già utilissime per lo studio scientifico dei dipinti. Con la Fluorescenza U.V., ad esempio, si riusciva a mettere in perfetta evidenza i ritocchi di un dipinto, che appaiono scuri perché i materiali organici in essi contenuti, ancora recenti, non hanno sviluppato fluorescenza.

Con l'infrarosso, grazie al minor '*scattering*' della radiazione rispetto al campo '*visibile*', era possibile '*attraversare*' parzialmente gli strati pittorici più esterni di un dipinto e osservare, ad esempio, i '*pentimenti*' dell'artista e addirittura, in alcuni casi fortunati, i disegni preparatori del dipinto (per questo, alcuni decenni dopo, sarebbe stata sviluppata la potentissima riflettografia infrarossa).

Parallelamente e nei decenni successivi, si sarebbero sviluppate le tecniche più propriamente archeometriche fra cui citiamo la *datazione con carbonio 14*, conquista della scienza e della tecnologia, che ha messo a disposizione degli archeologici uno strumento utile ma ancora soggetto a errori, per aiutare a confrontare e confermare le datazioni ottenute secondo i metodi tradizionali di studio (stratigrafico, morfologico, stilistico, ecc.) dei reperti, attraverso analisi sistematiche sul decadimento radioattivo dell'isotopo a peso atomico 14 del carbonio. Esso è contenuto in ridottissima percentuale nel carbonio delle sostanze organiche di origine vivente. Certamente è una

tecnica inapplicabile su reperti ceramici, lapidei, metallici, laterizi, ecc. ma utile, pur nell'ambito dell'errore, laddove si dispone di resti di natura organica (oli, cere, frammenti di stoffe, ecc.). Qui ci fermiamo, nelle esemplificazioni del percorso storico, per considerare invece ciò di cui oggi si dispone e ciò di cui si avverte invece la necessità.

Stato dell'arte e carenze

Osserviamo innanzitutto che è raro che una tecnica di analisi o di indagine sia stata sviluppata espressamente per le esigenze dei BB.CC.. Quasi sempre, invece si è verificato il contrario. Gli esperti scientifici dei BB.CC., i *Conservation Scientists* (archeologi, storici dell'arte, chimici, fisici, geologi, biologi), venuti progressivamente a conoscenza di metodi d'indagine sviluppati per la ricerca in genere, per lo studio dei materiali, per il controllo analitico di produzione, per applicazioni in particolari settori, ne hanno introdotto l'uso nei BB.CC.. Attraverso un processo spontaneo, sono state selezionate le metodiche più rispondenti alle esigenze dello studio scientifico degli oggetti antichi, ne sono stati valutati pregi e limiti e oggi sono divenute tecniche ricorrenti d'impiego per le opere d'arte.

I metodi d'indagine non invasivi per *'imaging'* hanno avuto un grande sviluppo negli ultimi due decenni, grazie alla disponibilità sul mercato di telecamere e scanner dotati di sensori CCD operanti in ambiti spettrali confinanti con il visibile (U.V. e soprattutto I.R.) e grazie alle tecniche di digitalizzazione delle immagini. Le regioni spettrali sfruttate, in ordine di lunghezza d'onda crescente, sono i raggi γ , i raggi x, gli U.V., il visibile, l'I.R. sotto 2 μ , l'I.R. termico, le onde radar.

Della *radiografia* (raggi X) si è già fatto un cenno tra le tecniche storiche. Oggi lo spettro si è allargato verso la regione di radiazioni a massima energia (raggi *gamma*) con la *gammaografia*, che offre, in forma assai più potente, prestazioni analoghe a quelle della radiografia, ampliando la possibilità d'indagine di strutture interne anche nell'ambito degli spessori notevoli (statue in marmo, terracotta, ecc.) e ai materiali costituiti da elementi pesanti (soprattutto bronzo e ferro).

La T.A.C. invece (*Tomografia Assiale Computerizzata*), così risolutiva in campo medico, e altrettanto potenzialmente nei BB.CC., stenta ancora a divenire disponibile in versione più semplice, economica e portatile, per poter essere adottata in cantieri e laboratori pubblici di restauro, come mezzo diagnostico per l'analisi strutturale degli oggetti tridimensionali come statue e sculture in genere. Nella *regione U.V.* è soprattutto la *Fluorescenza U.V.* (anch'essa già citata tra le tecniche storiche) a giocare un ruolo primario nelle indagini per i BB.CC., grazie alle intense fluorescenze nel visibile dei materiali organici invecchiati quando eccitati da raggi UV.

È una tecnica importante non solo per le pitture ma anche per manufatti lapidei, architettonici, ecc. laddove sono presenti vecchi trattamenti di restauro con materiali organici. Meno diffusa è la tecnica dell'*U.V. riflesso* (o *Riflettografia U.V.*) che tuttavia sta avendo sviluppi proprio attualmente, per la differenziazione/identificazione dei pigmenti. Un'evoluzione della Fluorescenza U.V. è la tecnica FLIM (*Fluorescence Lifetime IMaging*) che incrementa il potere informativo delle fluorescenze con il parametro del tempo di decadimento. Questo è strettamente legato all'identità dei materiali che in tal modo, attraverso il confronto con standard, possono essere caratterizzati.

È tuttavia ancora necessario un grosso lavoro di standardizzazione. Nel *visibile*, oltre alle grandi potenzialità offerte dalle *immagini digitali* (si veda il relativo capitolo), va citata per prima la tecnica della *Luce Radente*, importante strumento diagnostico per caratterizzare rugosità e irregolarità delle superfici. Questa tecnica ha il limite di essere rimasta finora nella dimensione dell'empirismo, con assetti costruiti al momento che portano a risultati scarsamente riproducibili.

Richiede dunque strumentazioni dedicate che non sarebbe troppo oneroso sviluppare. Sempre nel visibile abbiamo le *Tecniche Fotogrammetriche*, di estrema utilità per il rilievo architettonico e quindi per la progettazione stessa del restauro. La fotogrammetria sta ora sviluppandosi a *livello*

macro, su dimensioni piccole, offrendo nuovi strumenti di estremo interesse per il monitoraggio preventivo del degrado fisico delle superfici (micro-fessurazioni, micro-lacune, sollevamenti, deformazioni, ecc.). Anche i *sistemi laser-scanner* operano nel visibile offrendo un contributo oggi insostituibile, primariamente, nell'ambito del restauro architettonico, dove sono complementari con la fotogrammetria. Le riprese digitali eseguite sotto angolazioni diverse, vengono trasformate, via *software* specifici, in 'nuvole di punti' dai quali, grazie ai processi di 'rendering', sono restituite su monitor in immagini tridimensionali (3D) gestibili con effetti di rotazione, traslazione, zoom, ma anche passibili di misurazioni metriche di distanze, superfici, volumi, ecc. Le immagini 3D possono essere restituite in forme ancor più veritiere 'rivestendole', sempre attraverso *software* dedicati, con le 'texture digitali' riprese dalle superfici stesse degli oggetti. È chiaro che tale potente mezzo di gestione di immagini 3D capaci di imitare con elevata fedeltà gli oggetti solidi reali non è solo uno strumento di studio ma, all'interno di un museo, di valorizzazione a disposizione dei visitatori per 'manipolare' e osservare a piacimento sullo schermo le immagini virtuali delle opere esposte.

Venendo ora al *vicino infrarosso*, confinante col visibile, abbiamo le tecniche di I.R. in bianco e nero, Riflettografia I.R. e I.R. a falsi colori. Dell'*I.R. in bianco e nero fotografico*, si è accennato tra le tecniche storiche. Oggi questa tecnica è divenuta elettronica, grazie alla possibilità di acquisizione con telecamera I.R. o scanner I.R.. Il passo decisivo, in tal senso, è però avvenuto alla fine degli anni '60 ad opera del fisico Van Asperen de Boer, con le prime telecamere per *Riflettografia I.R.*, tecnica che negli anni si è poi altamente evoluta ed è oggi confluita negli *Scanner I.R.*. È un mezzo di grande potenza che permette di 'attraversare' gli strati pittorici dei dipinti e di accedere ai disegni preparatori degli artisti, sfruttando raggi I.R. tra 1 e 2 μ di lunghezza d'onda. Grazie agli scanner I.R. che eseguono riprese 1:1, la risoluzione ha raggiunto livelli molto elevati, consentendo ai tratti di un disegno preparatorio, invisibili a occhio perché totalmente sommersi dallo spessore degli strati pittorici, di apparire straordinariamente definiti. Sono ora in elaborazione nuovi *Scanner multi-spettrali*, che acquisiscono immagini monocromatiche a singole lunghezze d'onda, a partire dalle regioni dell'U.V. fino all'I.R. riflettografico. Consentiranno di discriminare con ancor maggior precisione disegni, ridipinture, pentimenti, nei dipinti. L'*I.R. a falsi colori*, infine, è una tecnica, originariamente fotografica, ora elettronica (sia con telecamera che con scanner) particolarmente utile per differenziare e identificare (in molti casi) pigmenti che hanno lo stesso colore visibile ma diversa capacità di riflessione dell'IR. Vengono attribuiti arbitrariamente colori R.G.B. di restituzione (per questo *falsi*) alle bande di acquisizione (G.B.IR.). Se ci spostiamo nell'infrarosso più lontano (lunghezze d'onda approssimativamente $>3 \mu$) entriamo nel campo dell'*infrarosso termico*. La tecnica è la *Termografia*, molto utilizzata in campo architettonico, per indagare strutture interne, invisibili a occhio, quali archi modificati, porte e finestre tamponate, tessiture murarie in materiali diversi, ecc.. Si basa sulla diversa risposta dei materiali (soprattutto da costruzione) in deriva termica, dopo un evento di riscaldamento (o di raffreddamento). L'inerzia termica dei materiali è variabile per cui, prima che essi tornino a regime uniformando la loro temperatura al sistema, vi sono momenti in cui presentano piccole differenze ben rilevabili dalla telecamera I.R. e restituite in forma di immagini in bianco e nero. Nella regione di lunghezze d'onda all'incirca localizzata tra 0,1 e 1 m, ovvero per radio-frequenze tra 10 e 200 MHz, si hanno le *Onde Radar*. Anche questo intervallo di radiazioni elettromagnetiche è stato sfruttato. La tecnica d'elezione è il *Georadar*. Si tratta di una procedura diagnostica per 'imaging' d'interesse in vari settori, primo fra tutto quello dell'archeologia. Le prospezioni georadar si effettuano generando impulsi radar, inviandoli attraverso un'antenna trasmittente nel terreno e rilevandone le riflessioni sempre tramite antenna. Con appositi *software* si possono rilevare discontinuità di materiali, strutture sotterranee, vuoti, tessiture murarie, e anche sacche di umidità a profondità di alcuni

metri. Con la dovuta perizia, si acquisiscono informazioni sulla struttura del terreno in forma soprattutto di mappe (pseudo-immagini più o meno accurate in funzione della configurazione della rete di rilevamento), soprattutto se questo è caratterizzato da bassa conduttività elettrica.

L'obiettivo più comune è dunque la ricerca di resti archeologici sotterranei, preventiva a uno scavo, ma lo strumento è utile anche in campo architettonico (fondazioni, ecc.).

Passando ora ancora alle *tecniche d'indagine non invasive a carattere puntuale*, va citata per prima la *Fluorescenza a Raggi X* (XRF), tecnica di analisi elementare, assai comune nei BB.CC..

La XRF è impiegata nello studio della composizione, elementare appunto, dei materiali posti in stretta vicinanza della superficie, delle tipologie più varie di manufatti. Una sorgente radioattiva portatile posta a contatto della superficie da analizzare, innesca un fenomeno di fluorescenza con la produzione di raggi X caratteristici degli elementi presenti nel materiale. Il limite sta nel fatto che gli elementi leggeri (generalmente, con peso atomico inferiore al sodio) non vengono rilevati (sono esclusi quindi i composti organici). Varianti di questa tecnica (TXRF- *Total X-Ray Fluorescence analysis*) sono in grado di amplificare notevolmente la sensibilità dell'apparecchio. L'aria frena i segnali X, soprattutto se a bassa energia. Aiutandosi con flussi di Elio diretti sulla superficie si può migliorare la risposta degli elementi a numero atomico più basso. La *Spettrometria di Riflettanza a Fibre Ottiche nel Visibile e Vicino Infrarosso* (VIS/NIR FO-RS) è metodica comunemente usata per la caratterizzazione dei pigmenti. Può identificare anche sostanze incolori (minerali, sali), che abbiano uno spettro di riflettanza caratteristico nel vicino infrarosso. La tecnica FT-IR, *spettrofotometria di assorbimento nell'infrarosso* (si veda *ultra* le analisi microdistruttive), è fondamentalmente da laboratorio ma, è disponibile anche in versione portatile (per questo viene citata nella scheda sul monitoraggio, si veda *ultra*) come *FT-IR di riflettanza portatile*.

Essa fornisce la composizione molecolare per mezzo di una sonda accostata alla superficie, nel punto da esaminare. È in apparenza una metodica di grande potenza, che però soffre di un limite intrinseco: le sostanze presenti in superficie sono spesso contaminate da impurità generiche in quantità anche assai modeste, che coprono tuttavia il segnale dei materiali che interessano. Per questo problema non si vede però una possibilità di correzione attraverso una variante costruttiva.

La *Microscopia Raman portatile* è una tecnica citata anche più avanti (si veda paragrafo relativo alle analisi microdistruttive), come metodica da laboratorio nonché, in quanto portatile, nella scheda sul Monitoraggio. La versione portatile è potenzialmente di grande utilità per analisi molecolari esclusive per i composti inorganici. Anche in questo caso sussiste un problema, che tuttavia è passibile di correzione attraverso varianti costruttive. La *Microscopia Raman portatile* esamina *spot* di dimensioni estremamente minuscole, dell'ordine di pochi *micron*, un *range* in cui la presenza di una sostanza può risultare del tutto casuale oltre che invisibile, quindi non significativa. Sarebbe sufficiente, per superare il problema (posto che sia tecnicamente percorribile) ampliare, per via ottica, la dimensione dello *spot* oggetto di esame.

Per lo studio della composizione dei materiali le *tecniche d'indagine micro-distruttive su campione o su sezione*, si articolano nelle grandi categorie delle spettroscopie e delle cromatografie. Fa un po' gruppo a sé la Diffrattometria a Raggi X. Le *spettroscopie* sfruttano in genere l'emissione o l'assorbimento selettivo delle radiazioni elettromagnetiche in campi spettrali diversi, da parte della materia e in particolare dagli elettroni degli orbitali atomici o da quelli dei legami molecolari. Sono quindi correlate le une (elettroni atomici) a un'informazione sulla *composizione elementare* dei materiali esaminati, dalla quale poi - talvolta anche con grande difficoltà - si deve risalire ai composti a cui quelli elementi appartengono, che è poi l'informazione che realmente interessa, ma per questo occorre l'interpretazione di esperti scientifici di opere d'arte. Le altre (elettroni dei legami molecolari) forniscono un'informazione più precisa e diretta. Ovviamente esistono

interferenze e limitazioni anche notevoli in entrambi i casi, soprattutto in presenza di miscele, che è la situazione più ricorrente. Non costituisce invece un problema, in genere, la quantità di campione. Le moderne tecniche, infatti, sono divenute negli ultimi decenni altamente sensibili, cosa che torna a pieno favore delle applicazioni ai BB.CC. nelle quali è d'obbligo operare su campioni microscopici. I campioni richiesti per l'analisi possono essere oggi praticamente invisibili, per cui la difficoltà non sta nell'analisi ma nella possibilità fisica del prelievo. Tra le tecniche più in uso e più potenti in quest'ambito citiamo la *Spettrofotometria IR a trasformata di Fourier (FT-IR)* e la *Spettrofotometria Micro-Raman*. FT-IR è una tecnica molecolare, estremamente diffusa nel settore BB.CC., di impiego generale, per composti organici e inorganici, semplici o polimeri, con poche esclusioni (ossidi semplici, solfuri, alogenuri anidri). La 'Micro-Raman' è una tecnica molecolare valida per l'intero fronte dei materiali inorganici (pigmenti, sali, minerali, ossidi, ecc.), tra le più sensibili (si possono analizzare in sezione aree di pochi *micron* di diametro), ma disturbata dalla compresenza di materiali organici.

Le *cromatografie* sono tecniche di separazione delle sostanze seguite da successivo riconoscimento. La *Gascromatografia (GC)* è oggi normalmente accoppiata alla *Spettrometria di Massa (MS)*, tecnica di complemento alla prima, per identificare ciò che con la GC si separa. Per composti non volatili (sostanze insolubili, polimeri reticolati) la sequenza può essere *Pirolisi (Pyr)-GC-MS*, dove la Pirolisi gioca il ruolo di volatilizzare preventivamente per termo-decomposizione il campione da immettere nel gas-cromatografo. Queste tecniche, nel loro insieme, sono quelle solitamente impiegate, più potenti, sensibili e precise per l'analisi dei composti organici, che è il target analitico più problematico. I composti organici che si ritrovano nei manufatti antichi (oli, proteici, polisaccaridi, cere, resine, polimeri di sintesi), infatti, sono sostanze analiticamente complesse, soprattutto perché deperibili e quindi modificate nei secoli rispetto ai loro precursori originali e poi perché di solito presenti in quantità minimali. Altri tipi di cromatografie sono la *Cromatografia Liquida ad Alta Pressione (HPLC)*, che richiede di operare su sostanze solubilizzabili anziché volatilizzabili, come la GC, e quindi in particolare impiegata per l'identificazione dei coloranti organici dei tessuti e delle pitture (ma anche dei composti organici classici), e la *Cromatografia Ionica (IEC)*, tecnica qualitativa e quantitativa, pressoché indispensabile per lo studio dei sali (cationi e anioni), così diffusi in affreschi, statue, strutture architettoniche. Citiamo ancora la tecnica LIBS (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*), di analisi elementare, micro-distruttiva puntuale, basata sull'analisi spettrale delle radiazioni emesse dal plasma che si genera colpendo con un impulso laser (un fascio coerente di piccole dimensioni) un punto dell'oggetto. Si genera un microscopico foro che può essere ulteriormente approfondito con successivi impulsi, fornendo un profilo della composizione in funzione della profondità. La *Diffrazione a R.X. (XRD)*, infine, è tecnica a sé, che si fonda sul *pattern* degli angoli di diffrazione dei raggi X che attraversano una sostanza, caratteristici del suo reticolo cristallino. XRD è tecnica utilissima per l'identificazione (e lo studio) delle sostanze solide, purché cristalline, e quindi la maggioranza dei minerali, dei sali, delle malte d'intonaco, dei composti di corrosione metallica, dei pigmenti, ecc. Nel settore dei BB.CC. è però esclusa la maggioranza dei composti organici, in quanto costituiti da polimeri non cristallini.

Per lo studio dei campioni in sezione, le tecniche di elezione sono ovviamente le microscopie. In questa categoria abbiamo le Microscopie Ottiche, le Microscopie Elettroniche e le Microscopie in Infrarosso. Sono tecniche universalmente note per l'uso estensivo nel tempo e per il numero di discipline in cui vengono impiegate. Morfologia, colore, tono cromatico della fluorescenza U.V., effetti di polarizzazione della luce sono nella *Microscopia Ottica* (già citata tra le tecniche storiche), gli elementi caratterizzanti una micro-struttura osservabile in un campione in sezione ma anche l'identità di un determinato materiale (ad esempio un pigmento, una classe di leganti pittorici, un minerale). Nella *Microscopia Elettronica a Scansione (SEM)* l'elemento di forza è dato

dalla *Spettrotrometria EDS (Energy Dispersive x-ray Spectrometer)*, una tecnica di microanalisi elementare potentissima (si analizza ciò che si osserva puntualmente al SEM, ossia a ingrandimenti particolarmente elevati). Si possono ottenere mappe di distribuzione di singoli elementi nel contesto di una sezione. I limiti stanno negli elementi leggeri (C, H, O, N, ecc.), non determinabili, cosa che esclude a priori tutti i composti organici. Infine citiamo la *Microscopia FT-IR di riflettanza*. La tecnica FT-IR è già stata citata due volte come tecnica analitica di laboratorio su campione e come tecnica portatile su superfici di oggetti.

Accoppiata a un Microscopio Infrarosso essa diviene importante per lo studio della composizione molecolare in sezione, uno tra gli obiettivi più importanti dei BB.CC.. Il metodo ha dei limiti. Le aree esaminabili in sezione non possono essere inferiori a una soglia di 20-50 *micron*; i materiali per l'inclusione dei campioni generano interferenze analitiche, ecc. Recentemente ne sono uscite varianti di grande potenza che consentono il *mapping* molecolare (distribuzione di una sostanza nel contesto di una sezione) e altre ancora, che porterebbero questa tecnica di analisi al top delle possibilità in risposta alle esigenze.

Restano da citare almeno altre due categorie di tecniche, la prima delle quali è diretta alla *caratterizzazione delle proprietà dei materiali*, anziché alla loro identità o quantità. Comprende tecniche, per citare le più comuni, come la *misura della porosità*, di estrema importanza nello studio dei manufatti lapidei, per la quale si dispone di due metodiche dirette (*Porosimetro a mercurio* e *Porosimetro a elio*) e di due indirette, che valutano la *quantità d'acqua assorbita*: il *Metodo della pipetta* e il *Metodo della spugnetta*. Vi è poi la *misura dell'Angolo di contatto*, che è legato alle proprietà idrofobe/idrofile dei materiali, soprattutto in relazione ai trattamenti protettivi (si dispone praticamente solo di procedimenti da laboratorio); della *coesione*, che risulta essenziale per la verifica dei trattamenti consolidanti dei manufatti lapidei ma per la quale non si hanno procedure idonee se non a carattere distruttivo (*Metodo del 'drilling'*), utili quindi solo in laboratorio, su provini artificiali; della *rugosità delle superfici*, per cui ci si avvale soprattutto dei *Rugosimetri laser*. L'altra categoria di indagini è quella delle *analisi microbiologiche*. Le tecniche tradizionali sono basate sul *prelievo sterile di campioni* dalle aree sospette del manufatto, seguito dalla *crescita* dei microrganismi in *terreni di coltura* posti in incubatrici di laboratorio, all'*identificazione tassonomica della specie al microscopio stereoscopico e ottico* nonché tramite *test biochimici*. Oggi, grazie al repentino sviluppo di altre discipline si adottano anche *tecniche di immuno-fluorescenza* (fondate su interazioni antigene/anticorpo) e soprattutto, *tecniche di sequenziamento di DNA* seguite da confronto con standard noti, grazie a una banca di riferimento che sta sempre più crescendo. Per la verifica di un'attività biologica generica si utilizzano anche metodi di rilevamento in situ basati su *Fluorimetri portatili* che eccitano e misurano la fluorescenza della clorofilla (quindi validi solo per organismi foto-sintetici) oppure metodi da laboratorio, su campioni prelevati, che si fondano sul *controllo dell'ATP*, *marker* sicuro di attività biologica. Si tratta, per il momento, di procedimenti ancora sperimentali. Ciò di cui si avverte la necessità è invece soprattutto la disponibilità di mezzi diagnostici semplici da impiegare *in situ* (musei, monumenti) per rilevare, in fase preventiva, indizi anche minimali di attività biologica.

Orientamenti per l'innovazione tecnologica

Questo settore della tecnologia è manifestamente dominato da interessi di studio ed economici di dimensioni enormemente maggiori rispetto a quelli dei BB.CC.. È pressoché impensabile che apparecchiature con costi dell'ordine delle decine o delle centinaia di migliaia di euro, possano essere progettate e sviluppate a livello aziendale per le esigenze proprie dei BB.CC.. È invece del tutto probabile che il mondo scientifico dei BB.CC. continui, come sempre ha fatto, a selezionare e a utilizzare l'innovazione che emerge nell'ambito delle tecniche d'indagine implementate nell'ampio

dominio della ricerca. Dalla ricognizione effettuata emerge, tuttavia, che talune esigenze, molto specifiche del settore, non trovano ancora adeguata rispondenza nelle numerosissime tecnologie esistenti o in corso di implementazione. In molti casi sono state messe in evidenza, illustrando nel precedente paragrafo le singole tecniche. Da osservare che, laddove, per soddisfare le esigenze dei BB.CC., siano sufficienti lievi varianti tecnologiche da apportare alle apparecchiature esistenti, l'implementazione potrebbe essere realizzabile, a condizione di comportare costi veramente contenuti o meglio ancora, semplicemente, l'incorporazione di componenti speciali minori e l'assemblaggio.

Occorre però, anche per questo, favorire sistematici incontri tra le aziende produttrici e gli esperti dei BB.CC., incontri espressamente funzionali a render noti, da una parte, i bisogni e a verificarne, dall'altra, l'effettiva possibilità di realizzazione. In altri casi, dove invece sono sufficienti piccole strumentazioni, di costo contenuto, è più probabile che aziende di piccole dimensioni, che già producono linee di strumentazioni non dissimili, siano disposte ad accogliere le richieste venendo incontro alle specifiche necessità e realizzando, di concerto con gli esperti del settore, prototipi *ad hoc*.

9. MATERIALI E METODI PER IL RESTAURO

Significato, disponibilità e sviluppo di materiali e metodi per il restauro

Il tema dei materiali e dei metodi per il restauro delle opere d'arte è particolarmente vasto per almeno due motivi. Il primo è che le tipologie dei manufatti oggetto di restauro sono molteplici.

Basti pensare, per citare solo le principali, a dipinti su tavola e tela, affreschi e tempere murarie, statue lignee policrome, statue in marmo e pietra, architetture realizzate in materiali lapidei vari, oggetti e strutture in terracotta, oggetti in bronzo e altri metalli, mosaici, stucchi, tessuti e arazzi, manufatti in carta e pergamena. Ogni tipologia è caratterizzata da materiali costitutivi propri e da problemi conservativi specifici che richiedono, comprensibilmente, tecniche di restauro (e cioè prodotti e metodi) specifici e spesso esclusivi. L'altra ragione della vastità della tematica è dovuta al fatto che il restauro si articola in singole operazioni, esse stesse numerose e diversificate. Di nuovo, riferendosi solo alle operazioni principali, citiamo: pre-consolidamento, pulitura, consolidamento, trattamento dei supporti dei dipinti, protezione, verniciatura, integrazione delle lacune, integrazione pittorica, trattamenti di inibizione della corrosione, stacco/strappo di affreschi, trattamenti biocidi, ecc. Incrociando le tipologie dei manufatti con quelle dei trattamenti ci si può subito rendere conto di quanto sia vasto il fronte dei materiali e dei metodi che possono trovare impiego, a livello generale, nelle operazioni di restauro. A testimonianza di ciò, difficilmente si trovano in letteratura testi che trattino in maniera onnicomprensiva l'intero dominio delle conoscenze e dei campi applicativi. Esistono pubblicazioni che affrontano singole categorie di trattamenti quali, ad esempio, la 'pulitura dei dipinti murali', la 'verniciatura dei dipinti su tavola', il 'consolidamento e protezione dei manufatti lapidei', e simili. È necessario dunque operare una selezione che, nel contesto del presente documento, consiste nel privilegiare le problematiche per le quali la richiesta d'innovazione è maggiore e più concrete sono le possibilità di realizzazione.

Storicamente il restauro è iniziato con la produzione stessa delle opere, le quali, essendo costituite da materiali e da strutture comunque deperibili, da sempre hanno avuto la necessità di essere ricondotte a stabilità fisica e integrate. Ovviamente l'attenzione nei secoli passati è stata solo episodica, rozza nei criteri e sbrigativa nelle scelte. Già più cospicua e più evoluta è l'attenzione nel '700, ma è soprattutto a partire dall'800 che l'analisi della problematica si affina, i restauri divengono numerosi, si comincia a chiedersi se un trattamento possa considerarsi più o meno appropriato. Molti degli interventi eseguiti in passato potrebbero, oggi, essere classificati come

‘rifacimenti’ piuttosto che restauri, ma anche questo tipo di approccio, col tempo, è venuto a modificarsi e ad affinarsi. I grandi restauratori dell’800 e primo ’900 hanno cominciato a scrivere trattati prendendo in considerazione categorie di manufatti (Giovanni Secco Suardo, *Manuale ragionato per la parte meccanica dell’Arte del Restauratore di dipinti*, 1866; Ulisse Forni, *Il Manuale del pittore restauratore*, 1866, ecc.) e questi testi testimoniano le conoscenze e l’approccio di quei tempi, i criteri adottati, i materiali impiegati. Non dimentichiamo che la grande rivoluzione tecnologica della chimica, e quindi dei materiali disponibili anche per il restauro, è avvenuta soprattutto nella seconda metà del XX secolo. Prima di allora i materiali disponibili per il restauro (colle, consolidanti, vernici, protettivi, pigmenti, stucchi, ecc.) erano quelli stessi che gli artisti impiegavano e avevano impiegato per la realizzazione delle opere (caseine, oli, colle animali, cere, resine, terre, ocre, gesso, calce, sabbia, legno, ecc.). Infatti, negli interventi di restauri antichi, nei quali anche oggi si ha occasione d’imbattersi, non è sempre possibile distinguere, se non per la qualità della fattura e per la collocazione nell’opera, i materiali di restauro da quelli originali, soprattutto se di natura organica. Una sostanziale svolta innovativa è stata operata da Cesare Brandi (*Teoria del restauro*, 1963), fondatore e primo direttore dell’Istituto Centrale del Restauro di Roma, che pose le basi del moderno approccio al restauro e iniziò a introdurre criteri nella scelta dei trattamenti, criteri che avrebbero cominciato a fare da filtro nella selezione di materiali e procedure consentite. Brandi è noto soprattutto per avere sottolineato il *principio di reversibilità*, ossia della possibilità di ‘tornare indietro’ in un intervento, ossia di poter rimuovere, in maniera selettiva e innocua per l’opera, un materiale applicato, che nel tempo si dimostra (come spesso purtroppo accade) causa di danni ulteriori piuttosto che di benefici per l’opera. I principi operativi che condizionano e limitano le scelte dei materiali e dei procedimenti di restauro si sono ampliati e perfezionati negli ultimi tre decenni con l’introduzione del principio di *durabilità* e, conseguentemente, di *compatibilità*. Questi principi devono essere intesi come alternativi a quello della reversibilità quando questa - sempre auspicabile, peraltro - risulti irrealizzabile in taluni contesti o per certi materiali. In altre parole, se un materiale estraneo (consolidante, adesivo, vernice) introdotto in un’opera con una precisa finalità, per motivi diversi, risulti a distanza di tempo non più rimovibile, che esso, a maggior ragione, sia almeno durevole (stabile e a lungo funzionale) e, conseguentemente, compatibile con i materiali costitutivi dell’opera. Assai importante, poi, è il principio del *minimo intervento e della minima invasività*, che è diretto in primo luogo agli operatori (mai eccedere nelle quantità di un prodotto, nelle concentrazioni, ecc.) ma anche, indirettamente, ai prodotti stessi, i quali devono possedere intrinsecamente proprietà in grado di svolgere una determinata funzione, ancorché applicati in quantità minimali oppure, riferendosi alle procedure, affinché esse risultino al minimo invasive. Vi è ancora il principio della *ritrattabilità*, termine poco felice, con il quale ci si riferisce alla possibilità di ritrattare un’opera, in precedenza già sottoposta all’azione di un qualche materiale di restauro, con la stessa finalità (consolidarla, proteggerla, ecc.), senza dover rimuovere il vecchio trattamento (che a questo punto probabilmente risulta irreversibile). L’esame di questi principi non è certamente fine a se stesso ma, al contrario, strettamente finalizzato al discorso che si va a sviluppare, ossia l’innovazione nei materiali e nei metodi per il restauro delle opere. È evidente infatti che il rispetto di ciascuno di questi principi restringe - e in maniera significativa - il campo dei possibili materiali e procedimenti che possono essere accettati per il restauro delle opere d’arte. Altri importanti motivi di restrizione sono venuti dalle moderne normative per la sicurezza nei luoghi di lavoro. Si pensi che, appena 20-40 anni fa si utilizzavano liberamente e in quantità cospicue solventi e altri prodotti, che oggi sono assolutamente banditi dalla normativa vigente, perché corrosivi, tossici, mutageni. Tutto ciò è assolutamente corretto e giusto: prioritaria è la sicurezza per gli operatori; i materiali possono essere in qualche modo sostituiti, sebbene questo, come è intuibile, risulti assai problematico.

Al di là del soddisfare o meno i principi sopra esposti e dell'essere o meno pericolosi per l'operatore, va considerato poi il fatto che, a distanza di anni o di decenni, molti materiali si sono rivelati totalmente inappropriati, non tanto nel senso di inefficaci ma, in quanto, essi stessi causa di aggravamento delle condizioni di conservazione delle opere. Il restauro infatti si differenzia profondamente, per quanto riguarda prodotti e metodologie, dagli altri settori della scienza applicata e della tecnologia. Nel restauro si opera con intenti che si misurano nell'ordine delle decine di anni o più, e non certo nel corso di pochi anni. È comprensibile, quindi, come il risultato negativo sia sempre, purtroppo, nell'ordine delle cose. Si è portati, infatti, a valutare positivamente ciò che dà risultati apprezzabili nell'immediato senza assicurarsi che le prestazioni risultino durevoli per tempi lunghi. Ciò rende anche conto dello scarso generale interesse delle aziende produttrici di materiali speciali e innovativi verso questo settore che è visto come quantitativamente limitato e troppo complesso nelle problematiche.

Stato dell'arte e carenze

Parallelamente allo sviluppo industriale della chimica, il mondo del restauro, di riflesso, ne ha ampiamente risentito. Si è assistito, così, alla repentina e significativa immissione, nelle diverse operazioni, di materiali nuovi sebbene, come vedremo, non sempre con risultati positivi. Un esempio assai significativo è quello dei materiali polimerici di sintesi. Prima degli anni '50-'60, la maggioranza dei materiali organici polimerici, con i quali solitamente si formulano adesivi, consolidanti, stucchi, vernici, protettivi, ecc., erano tratti dal mondo naturale (*colle proteiche* o *poli-saccaridiche*, *resine naturali*, *oli*, *cere*, ecc.). Verso la fine degli anni '50 sono iniziati ad arrivare dagli Stati Uniti (dove l'industria chimica era assai più avanzata) i primi polimeri di sintesi, *vinilici*, inizialmente, *acrilici* subito dopo. Essi hanno invaso in tempi brevi il mondo del restauro, che ha creduto di riconoscere in questi nuovi polimeri proprietà inedite di grande interesse (trasparenza, proprietà ottiche incolori, resistenza al degrado biologico, facilità d'impiego, immediatezza di risultati ma, soprattutto, polivalenza d'impiego).

Un famoso (oggi per molti aspetti famigerato) polimero acrilico, il Paraloid B72, sembrò soddisfare simultaneamente una quantità di esigenze: ottimo consolidante, buon adesivo, buon protettivo, vernice, ecc.. Divenne infatti una panacea per una quantità di trattamenti destinati a tipologie di opere tra le più varie, soprattutto nel dominio dei manufatti lapidei e degli affreschi. Si diffuse dall'Italia verso molti paesi mediterranei, asiatici e in minor misura europei. Nei decenni successivi si prese gradualmente coscienza di un uso eccessivo di questo prodotto e di altri a esso affini; eccessivo nelle quantità e nelle destinazioni d'uso, con risultati in alcuni casi positivi, nella prevalenza discutibili, in particolari contesti (ad esempio, materiali lapidei porosi interessati da sali) sicuramente negativi.

Poiché il settore dei materiali per il restauro non è caratterizzato da aziende proprie specializzate, l'innovazione dei materiali è provenuta (e proviene) principalmente dalla selezione dei prodotti esistenti, formulati originariamente per altre destinazioni tecnologiche. Per questa via sono entrati a far parte delle comuni operazioni di restauro, oltre ai citati vinilici e acrilici, *polimeri siliconici* come consolidanti, *silani* e *poli-silossani* come protettivi, *resine epossidiche bicomponenti* per il consolidamento strutturale, *per-fluoro-eteri* come aggreganti per stuccature, *eteri cellulosici* come supportanti per solventi nella pulitura, vernici *poli-ciclo-esaniche* per i dipinti, *malte idrauliche* come *Ledan* e *Lafarge* per il consolidamento a iniezione di intonaci e strutture lapidee, *resine a scambio ionico* come desolfatanti di affreschi e lapidei, supporti in *vetro resina* e più recentemente in *fibra di carbonio* per affreschi staccati e altri interventi strutturali, *sali di ammonio quaternario* come biocidi contro l'attacco di funghi e batteri, *permetrine* contro gli insetti xilofagi, *benzotriazolo* per inibire la corrosione dei bronzi, e ancora *argille assorbenti*

tipo *Sepiolite*, *paste cellulosiche*, *adesivi cianacrilici*, *barre di titanio*, *tele in tessuti sintetici*, *coloranti di sintesi*, *acquerelli*, ecc.

Una quantità vastissima di materiali, alcuni dei quali hanno fatto progredire notevolmente la qualità del restauro, soprattutto se destinati al contesto appropriato.

L'innovazione dei materiali ha seguito però anche altre vie, più dirette, sebbene in misura minoritaria rispetto al precedente percorso. Ciò è avvenuto soprattutto ad opera degli scienziati della conservazione, chimici, geologi, biologi che operavano e operano nei grandi istituti pubblici di restauro: in Italia, nell'Istituto di Roma, l'Opificio di Firenze, l'Istituto di Patologia del Libro di Roma. In questo caso i materiali idonei sono stati espressamente ricercati per rispondere a precise finalità di restauro, attingendo agli analiti chimici normalmente reperibili in commercio. Sulla base di progetti di ricerca si sono messe a punto, attraverso studi e sperimentazioni di laboratorio, procedure innovative rispondenti alle effettive richieste dei restauratori. In questo modo, ad esempio, è nato il "*Bario*" (*idrossido di bario*), trattamento ideato dal chimico Enzo Ferroni per il consolidamento e la de-solfatazione degli affreschi, l'*ossalato di ammonio*, ideato da Mauro Matteini, per la passivazione (protezione) e il consolidamento di manufatti di natura calcarea come lapidei, affreschi e intonaci, le *calci nano-strutturate* ideate dai chimici Luigi Dei e Piero Baglioni per il pre-consolidamento di affreschi e materiali lapidei, i *resin-soaps* e i *solvent-gels* ideati dal chimico americano Richard Wolbers per la pulitura selettiva dei dipinti su tela e tavola, ecc.. Un approccio altrettanto interessante, sicuramente promettente, come è stato dimostrato dai risultati ottenuti in talune situazioni, è quello della biologia, o più propriamente della microbiologia.

È un tipo di approccio, cui potremmo riferirci col termine *bio-restauro*, che si è rivelato integrativo e talora migliorativo rispetto ai metodi chimici ora visti e a quelli fisici, dei quali di seguito viene fatto un cenno. Sono stati selezionati sia microrganismi (batteri, in particolare) sia molecole da loro prodotte (soprattutto enzimi e altre proteine) per svolgere ruoli diversi nelle operazioni di restauro. Un filone è quello della pulitura, in particolare della decontaminazione da sali; un altro è quello del bio-consolidamento; un altro ancora, per il momento meno sviluppato (ma le premesse esistono), è quello della bio-protezione. Storicamente è la pulitura che ha avuto per prima l'attenzione dei biologi. Le metodiche più classiche fanno riferimento agli *enzimi*, che nei sistemi viventi sappiamo essere efficacissimi bio-catalizzatori, capaci di fare avvenire a temperatura pressoché ambiente e in maniera assolutamente selettiva, reazioni apparentemente impossibili. Ai *sistemi enzimatici* nei BB.CC. sono stati dedicati studi e sperimentazioni notevoli. Sono state effettuate anche numerose applicazioni, con risultati molto efficaci in taluni casi (rimozione di colla animale, di caseina, di oli essiccativi, ecc.), deludenti in altri. L'enzima, che è una proteina la cui azione si esplica al meglio in fase acquosa, trova difficoltà ad agire in sistemi eterogenei liquido/solido (liquida la soluzione enzimatica; solido, il materiale da dissolvere). Inoltre, molti materiali organici invecchiati hanno subito alterazioni molecolari notevoli, che hanno modificato quella complementarità col substrato che l'enzima richiede. Occorrerebbe un pool di enzimi piuttosto che un singolo tipo. Vale senz'altro la pena, comunque, proseguire le ricerche sugli enzimi per una quantità di vantaggi di base che essi posseggono (assenza di tossicità, alta selettività, bassa invasività). I *batteri*, rispetto agli enzimi, possono presentare vantaggi, soprattutto negli interventi contro gli effetti deturpanti e devastanti provocati dall'inquinamento atmosferico in monumenti e architetture. Si allude in particolare alle croste nere solfatiche (da gesso) su marmi e su pietre e ai nitrati che invadono intonaci e materiali porosi. In questi sistemi complessi l'enzima trova difficoltà, mentre i batteri (desolfatanti nel primo caso; denitrificanti, nel secondo) sono in grado, per effetto di meccanismi di induzione genetica, di sintetizzare gli enzimi adatti alla degradazione del materiale, reagendo in modo "intelligente" nel contesto in cui si trovano. Batteri sono stati usati per produrre *bio-calcite* (carbonato di calcio via sintesi biologica) utili al consolidamento di

materiali lapidei calcarei, con risultati veramente notevoli, sebbene con non trascurabili problemi 'a latere', da risolvere o comunque attenuare. Per la medesima azione sono state proposte *proteine* specifiche, quelle che nel mondo animale sovrintendono alla formazione di gusci calcarei; ma è una via che si presenta complessa e costosa. Recentemente, sulla scia del metodo di protezione per passivazione basato su ossalato di calcio, si sta tentando la bio-formazione artificiale di ossalato di calcio protettivo sui monumenti. Quello naturale, le famose patine ossalatiche, ricordiamo, da secoli e secoli spontaneamente si forma. Dal 'fronte' dei materiali, di cui abbiamo tracciato una rapida (e di necessità incompleta) panoramica, veniamo ora alla procedure, ai metodi. Innanzitutto è necessario premettere che il materiale in sé, nella maggioranza delle situazioni del restauro, non ha un senso. Quando si cita un materiale, come sopra si è fatto, sempre è sottinteso un metodo, una procedura, che si concretizza in tempi, concentrazioni, solventi, temperature di applicazione, mezzi ausiliari, quantità di agente per unità di superficie, ecc.. Questo è il modo corretto di affrontare le problematiche: un approccio che richiede ricerca e innovazione tecnologica.

Al momento, tuttavia, col termine procedure, si vuole riferirsi, piuttosto, ai metodi fisici impiegati nel restauro. Sul fronte della pulitura, ad esempio, dai sistemi tradizionali impiegati fino ad alcuni decenni or sono, quali i *bisturi*, si è passati (in specifici contesti) ai *vibro-incisori*, alle *frese rotanti*, agli *ultrasuoni*, le *micro-sabbiatrici* e, in ultimo, ai *laser*, in progressivo marcato sviluppo. I laser stanno divenendo protagonisti di una quantità di applicazione specifiche, non certo per sostituire i metodi chimici o chimico-fisici esistenti ma, piuttosto, per integrarli e rispondere così ai problemi non risolvibili con le altre metodiche. Per fare un esempio, la salvaguardia (pulitura) di sottilissime decorazioni dorate ricoperte da spesse croste nere, talvolta presenti in antiche statue marmoree e bronzee, o la rimozione selettiva di scialbi di calce in affreschi è stata risolta in buona misura, proprio grazie ai laser. Di recente, alcuni tipi di laser (ad esempio, quello ad *Erbium-YAG*) si sono rivelati efficaci e selettivi per la pulitura dei dipinti su tela e tavola, un evento innovativo di grande rilevanza, sia perché i laser nel restauro dei dipinti erano visti, fino a ora con grande sospetto, sia perché lo strumento in oggetto consente, con soddisfacente sicurezza, di risolvere la rimozione selettiva di sostanze resistenti, come certe patine ossalatiche, per le quali, ancor oggi, esiste solo la via del bisturi, che è laboriosa e fortemente dipendente dall'operatore.

Orientamenti per l'innovazione tecnologica

Si è già detto più volte che il settore dei materiali innovativi e delle procedure di tipo chimico, fisico e biologico per il restauro non individuano, in genere, un mercato particolarmente attrattivo per le aziende. Anche se gli interventi di restauro in Italia e nel mondo sono tanti, la pratica di restauro non richiede normalmente quantità cospicue di materiali, tali da giustificare i costi sempre molto elevati della ricerca. Vi sono però eccezioni e, soprattutto, strategie da adottare per stimolare l'interesse delle aziende senza impegnarle a sostenere in prima persona aggravii economici non sostenibili. Diciamo subito che il settore di maggiore interesse, sotto il profilo dei numeri e delle quantità, è quello del restauro architettonico. Le grandi dimensioni che caratterizzano i beni architettonici - e in parte anche i siti archeologici - richiedono, assai più che per altre tipologie di manufatti (quadri, statue, tessuti, ecc.), quantità consistenti di materiali di restauro, di un livello che può motivare l'interesse dell'industria, a patto che si operi in maniera strategica. Per le aziende, re-indirizzare lievemente una linea di produzione, per venire incontro alle particolari esigenze del restauro, può non risultare eccessivamente gravoso, soprattutto se dall'operazione hanno un ritorno di visibilità, nel fregiarsi di aver operato per prolungare l'esistenza del patrimonio culturale nazionale. Affinché l'operazione possa aver successo occorrono alcune condizioni. È necessario correlare il 'bisogno di innovazione' con un monumento, un palazzo, una chiesa, un complesso architettonico di una certa notorietà. Per fare un esempio, se a livello generale occorresse migliorare la qualità delle malte necessarie

a realizzare certi tipi d'intonaco o alcune tinteggiature di rivestimento destinate a edifici storici, occorrerebbe, prima, individuare un complesso architettonico *ad hoc* per il quale questa esigenza è effettiva e motivare la crescita tecnologica associandola al restauro di quel monumento. Occorre poi coinvolgere nell'operazione più soggetti: un ricercatore o un gruppo di ricerca appartenenti a una struttura pubblica, preferenzialmente già specializzata nella conservazione dei BB.CC., un'azienda del settore e infine uno o più restauratori esperti che sappiano chiaramente indirizzare gli altri soggetti, in merito ai requisiti richiesti. È un modello operativo già più volte sperimentato, che può portare a risultati concreti. A un livello più generale, per favorire l'innovazione tecnologica nel settore occorrono anche altri tipi di iniziative: soprattutto, programmare occasioni d'incontro tra imprese produttrici di tipologie specifiche di materiali, potenzialmente interessanti per il restauro, e il mondo stesso del restauro (restauratori e ricercatori scientifici del settore, *in primis*, ma anche architetti, storici d'arte, archeologi). Il beneficio è duplice: il mondo delle imprese viene a conoscenza delle effettive necessità del restauro; gli operatori e gli esperti dei BB.CC. hanno modo di conoscere materiali, metodologie e tecnologie in genere già prodotte dalle aziende per altri settori applicativi, delle quali, il mondo dei BB.CC. è di solito all'oscuro, proprio perché i due mondi, solitamente, non comunicano. Veniamo ora a enucleare alcuni materiali o metodi di restauro sui quali, per le oggettive esigenze che si registrano e per una maggiore facilità di realizzazione, possono costituire esempi notevoli d'innovazione. Un problema fortemente sentito in numerosi settori del mondo del restauro (architetture, statue, affreschi, intonaci decorati, mosaici, laterizi, ecc.) è quello dei *sali solubili*. I sali solubili sono causa di danni gravissimi. Costituiscono un problema gigantesco, anche sotto il profilo economico, con poche soluzioni efficaci. Per alcuni sali (il gesso, in particolare) si è trovata la via, attraverso processi di insolubilizzazione (ad esempio, il già citato idrossido di bario) capaci di neutralizzarne permanentemente gli effetti. Rimane una maggioranza di sali (quelli di sodio e potassio, tutti i nitrati, tutti i cloruri) per i quali, al momento, non esiste soluzione efficace a tempi lunghi. Si mette in atto allora, di solito, una politica di manutenzione, realizzando interventi periodici di de-sorbimento dei sali dalle strutture invase, tramite l'applicazione di impacchi acquosi di materiali assorbenti che inizialmente sciolgono i sali e, in fase di essiccamento, li riassorbono per capillarità liberando la porzione più esterna delle strutture. I sistemi di assorbimento oggi disponibili sono tuttavia carenti: la 'forza' di assorbimento capillare dei materiali comunemente impiegati non è eccellente. Può però essere sensibilmente migliorata. L'adesione dell'impacco al substrato è critica. Se il contatto non è continuo e uniforme l'azione risulta inefficace. Occorrono collanti blandi che tengano bene aderente l'impacco senza ostacolare la permeazione delle soluzioni e che alla fine consentano la demolizione fisica 'indolore' dell'impacco.

Alcune polveri naturali di diatomite ('farina fossile') sono nano-strutturate. Hanno tubuli sottilissimi con elevato potere di assorbimento capillare. Formulare una miscela efficace e di facile impiego non risulterebbe troppo impegnativo e verrebbe incontro a un problema serissimo della conservazione, problema che interessa anche l'edilizia civile. Avendo citato una nano-struttura conviene subito fare una digressione sulle *nano-tecnologie* nei BB.CC.. Il loro ingresso in questo settore è recente e per il momento prudente, ma a parere di molti, passibile di fornire risposte importanti. Già con le *nano-calci* (L. Dei, P. Baglioni *et alii*), si è dato una risposta alquanto valida a una delle operazioni più difficili del restauro, il pre-consolidamento, un intervento con il quale si deve 'fare e non fare', per non ostacolare gli step successivi (pulitura, ecc.). Sono utili per gli affreschi, gli intonaci in genere ma anche per i litotipi calcarei. Promettenti appaiono le *nano-silici*, non tanto come consolidanti di strutture lapidee perché, pur costituite da nano-particelle sembra non sia facilmente superabile - a causa di fenomeni di ri-aggregazione - il problema della penetrazione efficace all'interno delle strutture porose, quanto come *protettivi per lapidei*. La silice è sostanza assai inerte e la presenza di un film sottilissimo (e quindi trasparente e incolore) di nano-

particelle di silice sulle superfici di manufatti lapidei vari, ma anche, intonaci e, perché no, bronzi, terrecotte, ecc., potrebbe dimostrarsi risolutivo del grande problema della protezione dei manufatti all'esterno. La silice è minerale e idrofila, come lo sono pietre, intonaci e metalli, non cambia colore nel tempo (a differenza dei protettivi polimerici organici), non tende a fissare le polveri sottili di sporco (come i protettivi idrorepellenti), non ostacola il transito dei sali, a condizione, beninteso, che si riesca a formare una deposizione non occludente i pori. Appare quindi degna di una seria attenzione da parte di aziende già nel settore e di ricercatori specializzati nel campo i quali, infatti si sono già attivati. Sempre nell'ambito delle nano-particelle una innovazione che risulterebbe degna di nota è quella dei *biocidi permanenti*. I biocidi adottati dal mondo dei BB.CC. provengono dalle sostanze sviluppate nel campo della conservazione alimentare e, in generale, dei materiali organici bio-deperibili. In larga maggioranza si basano su agenti di natura organica, che risultano altamente efficaci anche a basse concentrazioni (condizione importante nei BB.CC. poiché significa che sono poco invasivi) ma che li rende anche limitatamente stabili ed efficaci nel tempo. Questa, infatti, non è di solito una proprietà richiesta al di fuori dei BB.CC., dove uno o due anni di stabilità sono già sufficienti. Nei BB.CC. occorre invece una durabilità dell'ordine delle decine di anni; non è possibile infatti replicare i trattamenti ogni due o tre anni, sia per ragioni di costo che per motivi di accumulo dell'agente estraneo nel manufatto (difficilmente infatti sarebbe possibile rimuovere il precedente trattamento). Occorrono *biocidi permanenti* che di solito sono da ricercare tra le sostanze inorganiche, ma che sono praticamente scartati in quanto tossici, se solubili, anche per gli organismi umani. *Biocidi inorganici nano-strutturati*, a rilascio graduale e calibrato, potrebbero fornire una soluzione idonea. Ad esempio agenti pressoché insolubili, capaci però di rilasciare ioni di metalli pesanti in concentrazioni molto limitate, letali per la microflora ma innocue per l'uomo, offrirebbero una risposta promettente al problema che si pone per una quantità di tipologie di manufatti, conservati sia all'esterno che in ambito museale (si pensi alle collezioni di oggetti d'interesse antropologico, quasi tutti costituiti da materiali organici bio-deperibili).

Per concludere, dopo i materiali, è opportuno fornire qualche linea d'indirizzo anche sul fronte dei metodi, ovvero delle tecniche d'intervento di tipo fisico. Ritorniamo dunque sui laser dei quali già si è accennato.

Le *tecnologie laser* sono in evoluzione incessante e progressiva per le numerose e utilissime applicazioni che esse consentono nei campi più disparati. È in corso di evoluzione, ad esempio, un processo di compattazione dei laser. Quelli usati nel restauro sono ancora strumenti di dimensioni non piccole e, ancorché abbastanza maneggevoli, risultano, proprio per le dimensioni e la complessità, non sempre facilmente movimentabili soprattutto nei cantieri. Ciò incide, indirettamente anche sui costi, ancora elevati. La tecnologia di *laser a diodi* individua una linea di innovazione che potrebbe dimostrarsi molto interessante per il restauro. Un ulteriore aspetto di cui tener conto è quello della *flessibilità dei parametri* laser (durata d'impulso, lunghezza d'onda, energia). La selettività di azione, che è condizione ineludibile nelle operazioni di pulitura, soprattutto laddove sono in gioco policromie, è fortemente dipendente da questi parametri. In altre parole, se si vuole che il laser venga gradualmente a sostituire nella pulitura dei manufatti, i sistemi chimici, chimico-fisici o biologici più tradizionali, occorre che esso sia dotato di una possibilità di graduazione delle condizioni operative per adeguarsi rapidamente a ogni contesto da trattare, al limite anche variando le condizioni d'utilizzo all'interno di una stessa opera, da area a area, da pigmento a pigmento, da problema a problema. Non sarebbe difficile ampliare la lista delle linee tecnologiche di innovazione utili e promettenti per questa branca di attività dei BB.CC. legata ai materiali e ai metodi d'intervento. Qui, ci siamo dovuti limitare a poche indicazioni ma teniamo a ribadire il concetto di quanto possa risultare utile, particolarmente per questa nicchia, favorire gli incontri tra aziende specialistiche ed esperti addetti ai lavori.

10. TECNOLOGIE DI MONITORAGGIO

Premessa

Il *Monitoraggio* è un'attività tipica del dominio della *Conservazione* ed è tra quelle per le quali vi è maggiore aspettativa di innovazione tecnologica. La *conservazione preventiva* ha il compito di creare condizioni tali da sfavorire la progressione del degrado; la *manutenzione programmata*, di rimuovere gli effetti del degrado quando sono ancora incipienti; il *restauro*, infine, come intervento estremo, quello di riportare gli oggetti a condizioni di stabilità. Ognuno di questi approcci, tuttavia, richiede, prioritariamente, uno strumento di *quantificazione della progressione del degrado* per stabilire una scala di priorità, l'entità del rischio, ottimizzare il rapporto grado di urgenza/costi.

In quest'ottica è facile comprendere la crucialità del monitoraggio nella programmazione della conservazione. Monitorare significa quantificare la progressione di un evento. Nel monitoraggio sono sempre impliciti *misura* e *tempo*. Nel monitoraggio, infatti, non sono sufficienti informazioni soltanto qualitative; occorre quantificare l'entità di ogni parametro significativo. L'elemento *tempo*, poi, differenzia il monitoraggio dalla diagnostica, con la quale viene talvolta confuso. Quest'ultima *fotografia*, per così dire, lo stato di un'opera in un determinato momento della sua storia conservativa, generalmente prima di un restauro e in funzione di questo.

Il monitoraggio non ha un *focus* privilegiato sul restauro, ma affronta il problema dello stato fisico di un'opera nel suo divenire. Attraverso il monitoraggio si punta più a prevenire che a intervenire, non escludendo tuttavia entrambi gli approcci.

Obiettivi del monitoraggio

L'attività di monitoraggio dei BB.CC. si incentra su tre distinti obiettivi: *le cause del degrado (il loro evolversi)*, *gli effetti del degrado (la loro progressione)* e infine *la durabilità dei trattamenti di restauro*.

L'evolversi delle cause del degrado

Le *cause del degrado* si localizzano soprattutto nell'ambiente che circonda l'opera: si parla infatti comunemente di *impatto ambientale*. L'ambiente ha sempre interagito con gli oggetti, tuttavia, dallo sviluppo della società industriale in poi, e massimamente dopo gli anni '60 del secolo scorso, si è registrato un cambiamento epocale che ha profondamente accelerato il degrado del patrimonio culturale. Alle cause naturali si sono aggiunte cause di origine antropica. La profonda alterazione della qualità dell'aria, dovuta alle copiose emissioni gassose delle attività antropiche ha introdotto nell'ambiente agenti nuovi, molti dei quali pericolosissimi per la conservazione del patrimonio, soprattutto se esposto all'esterno. Alcuni di questi gas sono i precursori di *acidi fortissimi*, come l'acido solforico e l'acido nitrico, estremamente aggressivi per i materiali carbonatici, come il marmo, le pietre calcaree ricorrenti nell'architettura antica, e gli intonaci. Altri acidi, come il cloridrico, aggressivo per i bronzi, si formano nei processi industriali e negli inceneritori. In parallelo si è sviluppato un *particellato aerodisperso* di natura nuova, venuto ad aggiungersi alle polveri atmosferiche naturali, sempre esistite. Un componente di questo particellato, il carbone, per il colore nero, è fortemente deturpante quando si deposita e si accumula su statue, facciate, monumenti. Altre particelle sono di natura salina parzialmente solubile: fra queste il gesso e i nitrati. Il gesso, che ingloba e cementa il carbone e le altre particelle, è all'origine delle *croste nere*, che si osservano sulla maggioranza dei monumenti all'aperto. Nei materiali porosi il gesso penetra in soluzione all'interno e ri-cristallizza nei pori disgregando in maniera vistosa e drammatica la superficie di affreschi e statue. Ulteriori componenti (oli semicombusti, idrocarburi ad alto peso molecolare) sono untuosi e appiccicosi, rimangono aderenti alla superficie e favoriscono il fissaggio

permanente delle altre particelle. Vi sono poi da considerare gli agenti fisici quali la *temperatura* e l'*umidità*. Il pericolo, in questo caso, non sta tanto nei valori assoluti ma nelle fluttuazioni di questi parametri, che generano stress degradativi in quasi tutti i materiali. Connessa all'umidità vi è la *condensa*, acqua allo stato liquido, che si deposita sulle superfici fredde e veicola in soluzione sali e gas, accelerandone in modo determinante l'interazione con i materiali costitutivi delle opere.

Vi sono infine gli altri fattori fisici tradizionali, la *pioggia battente*, con la sua azione dilavante, l'*insolazione* che provoca gradienti termici, le *soluzioni saline*, che dal terreno risalgono per capillarità nei pori delle murature, il *vento*. E abbiamo ancora cause di natura biologica, sia micro-biologica (*licheni, funghi, alghe, batteri*) sia macro-biologica: la *vegetazione*. Le cause, come si vede, sono tante. Esse agiscono singolarmente o in maniera combinata. Evolvono nel tempo sia in concomitanza dei cambiamenti stagionali sia in funzione del modificarsi delle attività dell'uomo che ne sono all'origine. Per comprendere e quantificare l'impatto dei fattori ambientali, naturali e artificiali, sul patrimonio è necessario poterne misurare i valori e le variazioni nel tempo, in altre parole, monitorare.

La progressione degli effetti di degrado

L'impatto dei fattori ambientali induce effetti diversi di degrado degli oggetti. Questi possono essere inquadrati come:

- *alterazioni morfologiche*: deformazioni dimensionali (espansione, contrazione, rigonfiamento), perdita di materia (formazione di lacune), perdita di continuità (fessurazioni);
- *alterazioni fisico-meccaniche* (diminuzione della coesione, della adesione, della elasticità);
- *alterazioni chimico-fisiche* (variazione della porosità, del carattere idrofilo o idrofobo, ecc.);
- *alterazioni delle proprietà ottiche* (colore, lucentezza).

Nella maggioranza dei casi si tratta di effetti di natura fisica, non solo quando la causa stessa è fisica (temperatura, umidità, azione disgregante dei sali, ecc.) ma anche quando è chimica o biologica, poiché, in definitiva, anche queste inducono comunque effetti di disgregazione o di alterazione ottica. Ne risente soprattutto la superficie degli oggetti, che è la parte più esposta agli agenti, ma anche, in genere, la più pregiata di essi. Ovviamente, nel caso di eventi catastrofici (terremoti, alluvioni, guerre) si possono avere anche danni a carico della struttura. Le alterazioni variano anche di scala dimensionale. Si può andare da un livello *macro* (di solito correlato a danni strutturali) a un livello *micro*, ma ancora nell'ordine di ciò che è osservabile a occhio, oppure *invisibile*, ovvero visibile solo con mezzi ausiliari a basso ingrandimento. In ogni caso, più ci si allontana dalle condizioni fisiche originali di un'opera, più i diversi valori di cui essa è portatrice vengono compromessi o perduti. Detto questo, occorrono dunque strumenti in grado di rilevare: le alterazioni morfologiche, le alterazioni ottiche, le alterazioni chimico-fisiche, le eventuali alterazioni fisico-meccaniche strutturali.

Durabilità dei trattamenti di restauro

La questione si fa in questo caso più complessa. Un trattamento viene effettuato per assicurare una determinata funzione: un *consolidamento*, per il ripristino della coesione e dell'adesione, una *protezione*, per schermare la superficie dall'azione degli agenti ambientali, una *stuccatura* o un *restauro pittorico* per integrare parti mancanti massive o di superficie, una *pulitura* per rimuovere sostanze deturpanti o dannose. Nessun trattamento può assicurare la propria funzione per tempi illimitati. Vi è sempre una questione di durabilità. Quando la funzione viene a diminuire o a perdersi, occorre pensare a una ripetizione del trattamento (in pratica un nuovo restauro) oppure, nei casi meno gravi, a un intervento di manutenzione. Ma per valutare la situazione e decidere gli

interventi occorrono misure specifiche. Per ogni tipo di trattamento occorrerebbe, in teoria, un tipo di apparecchiatura specifica. È questo che rende complesso il monitoraggio dei trattamenti. Si aggiunga poi che, per il fatto stesso di dover essere ripetuto nel tempo, il monitoraggio richiede misure non invasive, cosa che riduce il campo delle strumentazioni idonee possibili.

Stato dell'arte e carenze

Per le tre tipologie di monitoraggio indicate, esaminiamo ciò che è attualmente disponibile e ciò di cui si avverte la carenza.

Rilevamento dell'impatto ambientale

È questo l'ambito che è stato maggiormente oggetto di attenzione e per il quale si dispone di numerose apparecchiature. Ciò è comprensibile, poiché le strumentazioni per il rilievo del microclima coincidono in larga parte con quelle usate per la caratterizzazione del clima a livello generale, quindi di ampio utilizzo, e con quelle del rilevamento dell'inquinamento atmosferico nei centri urbani, prassi ormai di *routine*.

Temperatura e Umidità

Per il rilievo in maniera programmata e continuata della *temperatura* e dell'*Umidità Relativa ambientale*, i vecchi termoigrografi sono stati ormai da tempo rimpiazzati da sensori elettronici di temperatura e umidità relativa (U.R.), collegati a *data-logger* (centraline di raccolta dati) dai quali è possibile, periodicamente, scaricare su computer i dati raccolti. Si dispone anche di sistemi capaci di trasmettere i dati a distanza via rete o via radio. Successivamente, *software* dedicati consentono di elaborare numericamente o in forma grafica i dati fornendo l'andamento, le medie orarie, giornaliere, stagionali, annuali, ecc.. Per la *temperatura di superficie dei materiali* si dispone di sensori a contatto che forniscono informazioni puntuali. Se invece occorre conoscere la *distribuzione della temperatura in un'area* si ricorre alle *tecniche termografiche*. Queste consentono una misura molto accurata capace di rilevare anche modestissimi gradienti di temperatura tra zone confinanti e, indirettamente, informazioni su materiali (e strutture) con inerzia termica diversa, presenti anche sotto la superficie e quindi invisibili a occhio. Più complessa e ancora non del tutto soddisfacente è la misura della U.R. nei materiali. Sono disponibili sensori di U.R. basati sulla conducibilità elettrica, con elettrodi a contatto della superficie (che però risentono anche della presenza di sali solubili), oppure che misurano l'U.R. dell'aria a contatto con la superficie dell'oggetto, meglio se all'interno di un foro praticato (ma allora il metodo diviene distruttivo) o con tecniche termografiche in I.R., attraverso una misura indiretta della temperatura delle superfici umide che si raffreddano per evaporazione, o basandosi sulla risposta di frequenze radio (metodi ad ultra banda larga).

Vento e Pioggia

La misura in continua del *vento* non presenta in genere problemi. Gli *anemometri* sono in grado di misurare la velocità in funzione della direzione e di essere collegati a *data-logger* e a stazioni di ricezione dati. Quanto alla *pioggia*, essa viene misurata (in millimetri) per mezzo dei *pluviometri*, che però, comunemente rilevano quella che investe superfici orizzontali, condizione che non sempre soddisfa le esigenze dei BB.CC., per cui occorre un impegno innovativo.

Inquinanti gassosi

Per il rilievo di quella parte degli inquinanti gassosi di interesse per i BB.CC. e che coincidono con quelli comunemente rilevati nell'atmosfera, si dispone di apparecchiature per la *misura diretta*

(analizzatori specifici di gas, spettrometri di massa, che però sono costosi e delicati) e di metodi di *misura indiretti* attraverso il prelievo di campioni al quale seguono analisi di laboratorio. I *campionatori* possono essere *attivi*, che utilizzano cioè pompe di aspirazione, o *passivi*, dotati di una cartuccia assorbente che cattura una certa quantità di inquinanti gassosi normalmente diffusi in atmosfera. Questi ultimi sono molto pratici e soddisfano sufficientemente le esigenze anche dei BB.CC. per gli inquinanti classici quali il biossido di Zolfo (SO_2), gli ossidi di Azoto (NO_x), l'Ozono (O_3) e il biossido di Carbonio (CO_2). Oggi sono disponibili anche campionatori per gas come l'acido cloridrico (HCl), importante per i bronzi, l'acido solfidrico (H_2S), in particolare per gli oggetti in argento, l'Ammoniaca (NH_3) per il rame, le sue leghe e i suoi pigmenti. Quanto ai cosiddetti VOCS (composti organici volatili) importanti per la salute umana, essi non hanno in genere un impatto rilevante sulla maggioranza dei materiali delle opere d'arte (salvo eccezioni). Più importanti invece, sono alcuni inquinanti volatili prodotti nelle vetrine di esposizione dagli stessi materiali costitutivi. In questo caso è la lunga permanenza a contatto dell'opera che può influire sul degrado. Nuovamente, si catturano questi composti con campionatori passivi e si analizzano con tecniche di tipo cromatografico (GC-MS, ecc.).

Particellato aerodisperso

Le polveri sospese in aria, come noto, sono tra gli inquinanti protagonisti dei nostri tempi, e provengono principalmente dal traffico veicolare nei centri urbani. È soprattutto l'intensità del traffico che ne provoca il continuo sollevamento. Più sono fini, più prolungata è la loro permanenza in aria, maggiore la probabilità d'accumulo sui monumenti, più difficile la rimozione, soprattutto dalle superfici corrose ed erose che li intrappolano nella rugosità. Per la valutazione quantitativa si dispone di campionatori passivi che misurano, mediante un turbidimetro-laser, la quantità di PTS (particellato totale) in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Alcuni apparecchi distinguono classi dimensionali di particellato (tipicamente le PM 10 o le PM 2,5 citate nelle normative per la salute) ma per i BB.CC. ha rilevanza il PTS. Si dispone anche di campionatori attivi (che catturano il particellato aspirando l'aria su filtri per tempi definiti). Per la caratterizzazione dei componenti raccolti su filtro devono poi seguire complessi procedimenti di analisi chimica, poiché ancora non si dispone di un apparecchiatura dedicata, per la quale occorre un impegno di ricerca. Campionatori simili (che raccolgono su filtro) sono disponibili anche per il bio-aerosol (pollini, spore, microrganismi, particelle organiche), che vengono poi caratterizzati tramite specifiche procedure biologiche.

Monitoraggio del degrado delle opere

Delle diverse manifestazioni di degrado che si producono nelle opere, sono soprattutto le *alterazioni di colore* a disporre di strumentazione specifica di misura. Colorimetri e spettrofotometri, infatti, sono necessari in numerosi altri settori di impiego comune e assai più ampio che nei BB.CC.. Già, tuttavia, per una misura di *lucentezza* (o per converso di *opacità*) si dispone di una gamma assai più limitata di apparecchiature venute in commercio in versioni pratiche solo di recente. È una misura importante per i BB.CC. per cui è auspicabile lo sviluppo di tecnologie innovative.

Se si passa alla caratterizzazione delle *alterazioni morfologiche* (di dimensioni, di integrità, di continuità) vi è assai poco di disponibile in commercio. È ovvio infatti che la valutazione di queste variazioni, per avere una valenza preventiva, deve essere effettuata a livelli micro (prima che i fenomeni siano rilevabili a occhio) e *in situ*. La difficoltà sta nel soddisfare entrambe le esigenze.

Gli scanner 3D, così diffusi per eseguire i rilievi in ambito architettonico, hanno una sensibilità per il momento insufficiente. I *rugosimetri*, capaci di misurare il micro-profilo di una superficie, sono soprattutto strumenti da laboratorio; occorre invece disporne di portatili. Quanto alle alterazioni di tipo fisico-meccanico, se si tratta di valutazioni strutturali (compromissione dei tipici parametri

fisico-strutturali di edifici, ecc.) vi è una gamma ampia e soddisfacente di strumentazioni dedicate, di comune impiego nell'ambito dell'ingegneria edile. Se invece si tratta di misurare coesione, adesione, elasticità di film superficiali, ecc., le apparecchiature a disposizione sono carenti (beninteso, per misure da eseguire *in situ*, in cantiere o in museo). Stesse considerazioni valgono per parametri chimico-fisici, quali la porosità e la bagnabilità. Per la porosità, in verità, si dispone almeno di apparecchiature per misure indirette (misura della capacità di assorbimento d'acqua con il metodo della pipetta o il metodo della spugnetta). Quanto alla bagnabilità, la misura dell'angolo di contatto si effettua ancora con apparecchiature prevalentemente di laboratorio.

Misura della durabilità dei trattamenti

Questa esigenza non è oggi ancora soddisfatta, dovendosi verificare il permanere della prestazione di un determinato trattamento. Per il *consolidamento* si dispone di alcune strumentazioni (ad esempio, *drilling devices*), che risultano applicabili solo in poche situazioni a causa della notevole distruttività che caratterizza la misura (producono un foro di alcuni millimetri). Le *tecniche* basate su *ultrasuoni*, non distruttive e utilizzabili anche *in situ*, non risultano, ancora, sufficientemente sensibili. Molti trattamenti di consolidamento, infatti, non interessano la massa dei materiali ma solo sottili fasce in vicinanza della superficie; queste sono infatti le parti del manufatto, alterate dal degrado, da consolidare. Analoghe considerazioni valgono per le *tecniche termografiche* (anch'esse sono atte a monitorare strutture massive, ma non trattamenti confinati in vicinanza della superficie). Tecniche di *olografia laser in doppia esposizione*, al contrario, risultano troppo sensibili, in quanto rilevano anche variazioni inconsistenti, non significative, ma soprattutto non si prestano alle condizioni di cantiere. Quanto ai *trattamenti protettivi*, per quelli ad azione idrofobizzante, la *misura dell'assorbimento d'acqua*, sebbene indiretta, può andar bene, ma per un trattamento passivante (come, ad esempio, quello dell'ossalato di ammonio) al momento non si dispone di metodi validi. Sulla durabilità di un *trattamento di pulitura* o di un *restauro pittorico*, fortunatamente, sono disponibili le tecniche di *misura del colore* e degli *altri parametri ottici*, che risultano significativi in quanto sufficientemente caratterizzanti. Quando si vuole verificare la *permanenza di un certo materiale di restauro* introdotto con un trattamento, indipendentemente dal mantenimento della sua prestazione, e verificare la sua *stabilità chimica* a distanza di tempo, ovviamente senza fare prelievi, si va incontro a problemi notevoli. La strumentazione di *analisi chimica non invasiva in situ* è infatti ancora carente. I materiali organici (fissativi, consolidanti, adesivi, protettivi, ecc.) in particolare, sono assai difficili da caratterizzare. La sola tecnica disponibile per questi è la *Spettrofotometria FT-IR portatile*, che però ha una soglia di rilevazione percentualmente molto alta (ossia, non rileva un materiale se la sua concentrazione è al di sotto di alcune unità percentuali, valore che spesso cade proprio nel *range* da monitorare). Per i materiali inorganici la situazione è migliore. Si può contare su tre tecniche. Due di esse forniscono informazioni solo sulla composizione elementare (XRF e LIBS). La terza (MicroRaman portatile), anche a livello molecolare. Con le prime due, tuttavia, non tutti gli elementi sono determinabili, soprattutto quelli leggeri. Con la seconda (*MicroRaman*), il problema sta nelle dimensioni dello spot esaminato dal fascio dell'apparecchio: si è nell'ordine di pochi micron, dove una presenza, soprattutto per una superficie in esterno, è spesso solo casuale.

Orientamenti per l'innovazione tecnologica

Il quadro descritto consente di individuare alcune principali direttrici dell'innovazione tecnologica nel campo del monitoraggio.

Nell'ambito dei parametri fisici (temperatura e umidità) la ricerca si indirizza verso il miglioramento dei metodi di misura dell'*umidità nei materiali*, in particolare la *misura a distanza*

della distribuzione spaziale dell'umidità sulle superfici (mappatura). Questa rilevazione risulta di grande interesse e utilità non solo per i BB.CC., ma anche, ad esempio, nell'edilizia civile, dove è passibile di una quantità di importanti applicazioni, come l'individuazione di sorgenti di umidità nelle pareti di un edificio, l'affidabilità di coperture nei confronti di infiltrazioni, l'efficacia di trattamenti di risanamento e via dicendo. La strumentazione idonea è da ricercare nei sistemi di rilevazione a infrarossi (in domini di lunghezze d'onda dove l'acqua assorbe la radiazione), sistemi che già esistono per impieghi militari ma non sono ancora disponibili a livello commerciale.

Per la *misura della pioggia* la ricerca è orientata verso pluviometri in grado di effettuare la raccolta anche in verticale o lungo inclinazioni a piacere, per venire incontro a esigenze proprie del campo architettonico (pioggia battente nelle facciate, ecc.). Si ritiene che l'implementazione di pluviometri di questo tipo non risulti particolarmente complessa né costosa.

Altra area di sviluppo è quella delle *stazioni di rilevamento di parametri climatici multifunzione*, capaci di rilevare in maniera integrata i parametri che interessano i BB.CC.; quindi, non solo temperatura e umidità in aria e nei materiali, ma anche vento, pioggia, insolazione, ecc...

Altrettanto dicasi riguardo ad *apparecchiature* quanto più *automatiche e di basso costo per il rilevamento degli inquinanti gassosi*, non solo i gas che entrano nelle normali analisi atmosferiche (NO_x, SO₂, O₃), ma anche per HCl, NH₃, H₂S, che interessano soprattutto i BB.CC. E similmente per gli *apparecchi di analisi automatica dei componenti base* del particolato (quantità di componenti solubili in acqua, solubili in solventi organici, insolubili; qualità dei componenti solubili in acqua).

Nell'ambito delle misure dei parametri ottici, la sola misura del colore è insufficiente. Ciò che definiamo 'aspetto' è in gran parte determinato dalla combinazione di colore e lucentezza. Questa è un'area di sviluppo, che appare attualmente scoperta.

Servono, poi, *rugosimetri portatili*, basati su un metodo di misura che non risenta delle vibrazioni, inevitabilmente presenti in ponteggi e bracci mobili.

Le misure dei parametri fisici *in situ* (*coesione, adesione, elasticità di film superficiali; porosità, bagnabilità, carattere idrofilo/idrofobo delle superfici architettoniche*) soffrono tutte, ancora, di mancanza di apparecchiature specifiche. I problemi da risolvere per implementare questo tipo di strumentazione non sono facili, ma molte di queste rilevazioni hanno potenziale applicazione anche al di fuori del campo dei BB.CC..

Rimane infine il problema della *strumentazione atta a caratterizzare la composizione molecolare in situ*, dove lo sviluppo tecnologico è indirizzato verso strumentazioni applicabili in diversi settori, anche al di là dei BB.CC., in modo da garantire un mercato ampio e quindi portare a una riduzione sensibile dei costi.

Si segnala, ad esempio, che la Spettrofotometria Micro-Raman portatile, già disponibile, soffre di una eccessiva definizione, il che la rende insostituibile in laboratorio, ma inadatta per il monitoraggio *in situ*. In tale campo la ricerca è indirizzata verso lo sviluppo di ottica atta a realizzare strumentazione 'Milli-Raman'.

11. TECNOLOGIE DI DIGITALIZZAZIONE DELLE IMMAGINI BIDIMENSIONALI

Significato ed evoluzione tecnologica della riproduzione delle immagini

Le immagini trattate in questa scheda sono quelle che si registrano nel campo *visibile* dello spettro elettromagnetico. Altri tipi di immagini, acquisite in regioni spettrali diverse, come l'infrarosso, l'ultravioletto, i raggi X, ecc., fanno parte dei domini della *diagnostica* e dell'*archeometria*. Le immagini nel visibile, invece, sono primariamente dei documenti permanenti, più o meno fedeli, dell'aspetto delle opere d'arte, dei manufatti, dei monumenti. Nei BB.CC. interessano dunque,

soprattutto, il settore della *Documentazione* e dell'*Archiviazione*, con la funzione di conservare la memoria visiva di un oggetto come un dipinto, un disegno, una statua o una architettura. Vedremo più avanti che oltre a soddisfare le esigenze della documentazione, queste immagini possono avere anche altre importanti valenze.

Sin dall'antichità gli uomini hanno lasciato memoria delle opere da loro prodotte in raffigurazioni di vario tipo quali pitture rupestri, quadri, affreschi, disegni, bassorilievi, ecc.. Queste riproduzioni, che raffigurano oggetti contemporanei o più antichi dei tempi in cui sono state realizzate, ancorché eseguite con cura, difficilmente possono considerarsi delle testimonianze fedeli. Gli artisti, infatti, hanno spesso re-interpretato la realtà e non sempre è possibile, anche attraverso una analisi storica accurata, distinguere quanto in esse vi sia di attendibile o piuttosto di espressione della fantasia.

Molte opere, d'altra parte, sono andate perdute e ciò che è sopravvissuto (architetture, statue, dipinti, città) ha subito spesso trasformazioni profonde: superfetazioni, ridipinture, aggiunte di elementi, ricostruzioni, ecc.. È vero quindi che quelle raffigurazioni, pur carenti nella fedeltà, sono talvolta le sole su cui si può fare affidamento per ricostruire l'aspetto almeno approssimativo di un'opera.

La grande svolta nella fedeltà delle riproduzioni, è avvenuta con la *fotografia*. Essa ha aperto frontiere nuove, prima di allora impensabili. Come è noto la fotografia si è sviluppata a partire dalle scoperte e le sperimentazioni dei primi decenni dell'800, soprattutto ad opera di Louis Jacques Mandé Daguerre (1837) (dagherrotipi), di William Fox Talbot e Sir John Herschel (1835-1839), di Frederick Scott Archer (1851). Per un lungo periodo, fino alla fine dell'800, la fotografia riusciva a produrre solo immagini *in bianco e nero*. I sali di argento sensibili alla luce (cloruri e bromuri), dispersi in gelatina e stesi in film sottili coerenti su lastre di vetro, lastre metalliche, fogli di carta o cartoncino e, successivamente pellicole plastiche, fornivano per trattamento con opportuni bagni riducenti in camera oscura, immagini in tonalità di grigio, essendo l'argento, che si forma per riduzione, costituito da finissimi granuli neri. Inizialmente le lastre fotografiche non erano sensibili nella stessa misura a tutte le lunghezze d'onda (colori) del *range* visibile (lastre o pellicole *ortocromatiche*) per cui la realtà non poteva riprodurre con fedeltà le 'sensazioni di grigio' che suscitano i diversi colori. Più tardi, grazie all'aggiunta di opportune sostanze sensibilizzanti, le emulsioni fotografiche divennero *pancromatiche*: pur rimanendo in bianco e nero, riuscivano a raffigurare i colori in corretti toni di grigio. È stato solo l'avvento della *fotografia a colori*, con le esperienze dei fratelli Lumière (1903 e decenni successivi) a consentire un decisivo passo in avanti sulla strada della rappresentazione veritiera della realtà e, per quanto ci riguarda, delle opere d'arte. Da un certo periodo in poi, le immagini registrate su pellicola (negative a colori) sebbene con colori invertiti rispetto a quelli reali, erano (e sono tuttora) riproduzioni sufficientemente fedeli della realtà. Ma è già un problema, ad esempio, che questa stessa fedeltà di riproduzione, soprattutto dei colori, venga mantenuta anche nelle stampe su carta. La carta, infatti è un supporto meno adatto della pellicola a registrare le infinite sfumature dei chiaro-scuro e dei colori reali.

D'altra parte, sono proprio le stampe i documenti più adatti all'archiviazione e soprattutto alla consultazione. Per decine e decine di anni, le soprintendenze, i musei, le strutture di tutela in genere hanno tenuto cataloghi di schede di opere in cui i documenti fotografici più accessibili erano le stampe, spesso in bianco e nero. Le stampe in bianco e nero costano assai meno e hanno inoltre una migliore stabilità nel tempo. Tuttavia, altre forme di positivo sono possibili, prima fra tutte, la diapositiva, un positivo a colori su pellicola (pellicola invertibile). La diapositiva a colori rappresenta, probabilmente anche oggi, la forma di documentazione fotografica a colori più fedele. Certamente, per essere osservata nei dettagli, la diapositiva richiede un sistema di proiezione che ne permetta l'ingrandimento, cosa che non facilita la consultazione. Altre forme di positivi, su carta in questo caso, sono i diversi standard delle *stampe tipografiche*, con i quali

sono possibili, come è noto, riproduzioni sia in bianco e nero che a colori anche di altissima qualità. Le stampe tipografiche, uno dei capisaldi di tutte le forme di editoria moderna, non hanno mai avuto, tuttavia, un impiego sistematico nell'ambito dei documenti d'archivio, quelli di cui si tratta in questa ricognizione, sia a motivo della laboriosità di realizzazione delle matrici sia, di conseguenza, per i costi elevati.

Qualunque sia il supporto (lastra di vetro, pellicola o carta) e la forma dell'immagine (negativa o positiva), uno dei grandi problemi degli archivi fotografici tradizionali è stato ed è quello della *durabilità*. Ciò è tanto più vero, come già si è fatto notare, per le immagini a colori. Le registrazioni fotografiche sono costituite da materiali di natura varia: carte e pellicole dei supporti, l'argento che si produce dallo sviluppo, i leganti e i disperdenti per i sali di argento, i coloranti e i pigmenti delle foto a colori, ecc., tutti materiali caratterizzati da una propria deperibilità. La loro durabilità, se può soddisfare un generico fruitore, non è sufficiente per le esigenze di un archivio, soprattutto di riproduzioni di opere d'arte. Il rinnovo periodico degli archivi fotografici tradizionali delle opere di un museo o appartenenti al territorio di una Soprintendenza, è stato (ed è tuttora, per quegli archivi che sono rimasti tali) un problema serio per il lavoro necessario e per i costi che comporta.

Le fotografie oramai (quelle di pregio dei grandi fotografi e soprattutto le prime collezioni apparse) sono divenute, esse stesse, dei BB.CC. da conservare e spesso da restaurare. Fortunatamente, quando il rinnovo degli archivi fotografici stava per divenire un problema cruciale, si è verificata una seconda straordinaria rivoluzione: l'avvento della fotografia digitale.

Con la *fotografia digitale* si arriva ai nostri giorni. In poco più di un decennio la fotografia digitale ha soppiantato quasi radicalmente la fotografia tradizionale. I vantaggi offerti sono enormi, sebbene non assoluti. La registrazione digitale delle immagini è una delle conseguenze della miniaturizzazione dell'elettronica. Nelle *fotocamere digitali* un *chip* (CCD, CMOS) sostituisce la pellicola. Nel *chip*, una matrice di micro-elementi fotosensibili a semiconduttore, che costruiscono gli ormai popolarissimi *pixel*, registra, punto per punto, i dati che caratterizzano l'immagine luminosa: il colore (ovvero la frequenza della luce), l'intensità del segnale (più o meno luminoso) e ovviamente la posizione del punto nell'immagine. I meccanismi di acquisizione fotoelettronica sono comprensibilmente complessi e diversificati a seconda dei sistemi adottati.

Essi non sono tra loro equivalenti e sono tra i fattori che contribuiscono alla qualità dell'immagine. Non occorre in questa sede entrare nei dettagli tecnici della materia, anche perché l'innovazione e l'avanzamento tecnologico nel settore non sono certo influenzati dall'impiego nel mondo dei BB.CC., comprensibilmente limitato rispetto all'enormità del mercato nella sua globalità. Più densi sono i *pixel* nel *chip* (e quindi più essi sono miniaturizzati), più la registrazione dell'immagine risulta *definita*. Ogni elemento fotosensibile colpito dalla luce emette un segnale elettrico che viene tradotto in una informazione numerica (digitale, appunto) registrata nella memoria della fotocamera. Trasferita successivamente l'informazione numerica a un computer, attraverso un processo informatico-elettronico, in parte inverso a quello dell'acquisizione, si ricostruisce su monitor l'immagine. A questo punto, grazie a *software* dedicati, si può gestire l'immagine registrata nel modo che si ritiene più utile. La straordinarietà di questo processo ha innescato un fenomeno di massa di tale portata da rendere accessibile la fotografia digitale pressoché a chiunque. Quando eventi del genere si verificano i costi della tecnologia subiscono un abbattimento impensabile e la qualità tecnologica, per contro, una crescita straordinaria, a tutto favore di prodotti sofisticati e affidabili a costi accessibili. Cos'è che fa la qualità di un'immagine digitale? Comprensibilmente fattori diversi. Non solo la già citata densità di *pixel* nel *chip*, oggi conteggiata in milioni (mega-pixel, MP), ma anche la *profondità*, in *bit*, di registrazione del colore (ossia la capacità di discriminare una determinata sfumatura di colore rispetto a quelle contigue), all'ottica della

fotocamera digitale, fattore di grande rilevanza legato alla qualità degli obiettivi, che sovrintende alla nitidezza dell'immagine, e naturalmente alle condizioni di ripresa, (quantità di luce, tipo di luce, distanza fotocamera-soggetto, staticità del soggetto rispetto alla fotocamera, ecc.): una quantità di fattori diversi ben noti ai fotografi professionisti. I costi delle fotocamere digitali, oramai talmente contenuti da risultare accessibili (a un certo livello di qualità) al gran pubblico, non sono più un problema nemmeno per il mondo professionale, ossia per gli apparecchi di elevata qualità.

Stato dell'arte e carenze

Benefici e limiti della digitalizzazione delle immagini. Le immagini digitali possono esser archiviate con una flessibilità non paragonabile a quelle fotografiche. L'ingombro fisico è pressoché scomparso, sebbene sostituito dall'ingombro nelle memorie di massa (hard disk, DVD, ecc.) (un'immagine digitale ad alta definizione può risultare assai 'pesante' in termine di byte); ma le memorie di massa stesse sono in rapidissima evoluzione, nel senso che divengono sempre più potenti e meno costose. Dunque, la registrazione fotografica digitale appare quanto di più ideale esiste per soddisfare le esigenze dell'*Archiviazione* nel campo delle immagini d'interesse per il patrimonio culturale. Eppure le cose non stanno esattamente in questi termini. Intanto, i formati di registrazione sono diversi (RAW, TIF, BMP, JPG, ecc.), tra loro non equivalenti ed essi stessi in evoluzione. Alcuni contengono molta più informazione rispetto ad altri (formati compressi) che però risultano meno 'ingombranti'. È evidente che per la *Documentazione* di opere d'arte ci si riferisca al meglio della tecnologia in atto. Tuttavia, la rapidissima evoluzione di questa, pone nuovamente un problema di aggiornamento degli archivi, che alla lunga può risultare un compito frustrante. Vi è poi l'aspetto della *Consultazione*. Consultare archivi informatici è quanto di più pratico possa esservi. Le immagini possono essere ricercate e richiamate con una rapidità impensabile per chi operava nel settore appena dieci-venti anni fa. Lo schermo, fra l'altro, offre un'immagine costituita da *luci-sorgenti*, straordinariamente più brillante e veritiera rispetto a quella ottenuta con *luci-riflesse*, come nelle stampe cartacee. L'informazione digitale essendo numerica (virtuale) non si deteriora. Ciò tuttavia è vero fino a un certo punto: l'informazione numerica è teoricamente 'eterna', ma tali non sono i supporti materici che la registrano (hard-disk, CD, DVD, ecc.). Questi devono essere periodicamente rinnovati, il che significa replicare con congrua periodicità l'informazione trasferendola su supporti nuovi. A livello di un grande archivio, questa diviene un'operazione lunga e quindi dispendiosa. La consultazione effettuata su archivi informatici offre, per altri aspetti, una potenzialità straordinaria. Gli archivi di immagini possono essere immediatamente correlati agli archivi di informazioni e/o viceversa. Si possono effettuare potenti operazioni di *search* con relativa facilità e grande rapidità. L'archivio digitale informatico diviene quindi uno strumento potentissimo di *consultazione intelligente* (per estrarre dati, fare confronti fra opere o parti di opere e quant'altro).

Ma vi sono altre categorie di attività dei BB.CC. che traggono benefici impensabili dagli archivi di immagini digitali: ad esempio il *restauro* fase cruciale, come sappiamo, della *Conservazione*. Il restauro è operazione fisica che si compie su 'oggetti' unici, per cui si impongono scelte di grande ponderazione. Ciò che si effettua è infatti quasi sempre irreversibile. Ma per le opere figurative (affreschi, dipinti su tela e tavola, disegni) e per tutti i tipi di modellati (statue e architetture) si apre la possibilità del *restauro virtuale*. Che non è, si badi bene, operazione che sostituisce l'altra, bensì un restauro che *simula* l'altro o ne simula delle fasi critiche proprio in fase preventiva, per verificare ipotesi operative (per quanto riguarda l'aspetto, ovviamente, non certo per le implicazioni fisiche). Così, ad esempio, laddove in un dipinto vi siano lacune della policromia, prima di cimentarsi in una operazione di integrazione cromatica secondo un metodo piuttosto di un altro (metodi tra loro molto controversi, a seconda delle scuole) si possono favorevolmente simulare

al computer le diverse ipotesi, pervenendo così alla scelta su basi di maggiore consapevolezza e oggettività. La ricomposizione degli affreschi della volta della Cattedrale di Assisi, ridotti in frantumi dal disastroso terremoto di alcuni anni fa, ha giovato enormemente delle possibilità di simulazione offerte su computer. Come in un *puzzle*, le immagini digitali dei frammenti venivano virtualmente assemblate, grazie a *software* adeguati, fino a trovare l'associazione più rispondente, che veniva poi fisicamente eseguita. Operazioni simili possono essere condotte anche per problemi di riassettaggio di statue e modellati vari che abbiano subito in passato mutilazioni, fratture, sostituzioni di parti mancanti. In questo caso tuttavia, come per i monumenti architettonici, sono le immagini digitali 3D a giocare un ruolo determinante, grazie alle straordinarie possibilità offerte dai potenti *software* di *rendering*. A questo punto, tuttavia, entrano in gioco processi di acquisizione assai diversi da quelli delle immagini digitali trattati in questa scheda, processi che, eventualmente, verranno presi in esame in altra scheda. Per completare l'argomento basti citare che per il recupero di grossi complessi architettonici o edifici storici, i progetti d'intervento si avvalgono oggi in modo sostanziale delle simulazioni in 3D al computer. Queste, insieme ai rilievi tradizionali, vengono presentate in anteprima alle commissioni esaminatrici per facilitare la valutazione, anche visivamente, delle proposte e a chi affidarne l'esecuzione.

Tornando ora alle immagini digitali bidimensionali occorre ancora citare le *riprese ad altissima definizione*, laddove cioè, ottimizzando i parametri in precedenza citati, si acquisisce dell'oggetto, ad esempio un dipinto, immagini a risoluzione molto elevata. Si tratta di operazioni al momento non ancora routinarie, che vengono eseguite occasionalmente su opere di grande importanza. Si vanno aprendo, così, percorsi impensabili in campi diversi: lo *studio delle tecniche pittoriche*, degli *stili*, delle *figurazioni* a un livello di definizione cui di solito non si è mai operato. L'alta definizione, infatti, consente di ingrandire al computer parti di immagini a livelli cui normalmente nessuno le ha mai osservate. Ciò avviene di fronte a un monitor con tutta comodità. Si osservano le pennellate, i dettagli figurativi più minuti per lo più mai notati in precedenza, che possono dar luogo a interpretazioni inedite di tipo storico, figurativo, stilistico e anche più prettamente attinenti alla tecnica fisica di esecuzione di un'opera. Questo approccio diviene allora uno strumento potente di *conoscenza* dell'opera che può portare alla luce nuovi significati e valori nascosti, non direttamente percepibili e che interessano quindi, anche e potentemente, la sfera della valorizzazione.

Orientamenti per l'innovazione tecnologica

La panoramica tracciata ha messo in luce gli ambiti numerosi e diversi nei quali le immagini digitali stanno portando un contributo innovativo determinante ai BB.CC. e ha indicato le direzioni verso cui si orienta lo sviluppo tecnologico per superare i limiti sinora incontrati.

Il miglioramento della *definizione delle immagini* è un processo che progredisce autonomamente sotto la spinta di un mercato assai vasto e di sicuro ritorno economico, indipendente dalle esigenze dei BB.CC., che ne verranno di conseguenza a beneficiare. Altrettanto si può dire - almeno in parte - circa la *fedeltà cromatica* delle riproduzioni. Questa è un'esigenza particolarmente sentita nei BB.CC., ma lo è anche per le applicazioni professionali in altri settori e in misura minore nel campo amatoriale. Dunque, anche sotto questo aspetto sono attesi miglioramenti a tutto vantaggio delle applicazioni alle opere d'arte.

Rimangono in discussione quelle innovazioni più specifiche, di cui vi è aspettativa nelle applicazioni per i BB.CC.. Queste si incentrano principalmente nello *sviluppo di software* espressamente dedicati al settore, un ambito praticabile, che può realizzarsi con costi sostenibili anche in riferimento a un mercato contenuto. L'implementazione di *software dedicati per la catalogazione di opere*, sistemi che sempre più si avvalgono di immagini e ne fanno il nucleo portante della gestione della catalogazione e della consultazione, è già in atto da parte di aziende e

società specializzate. L'impegno tecnologico si indirizza verso la semplificazione degli applicativi, soprattutto in riferimento alle operazioni più comuni e ricorrenti di cui può aver necessità un operatore archivista o uno studioso nelle sue ricerche. Si registra invece una tendenza a dotare gli applicativi di una quantità sempre maggiore di funzioni, che certamente ne potenziano l'impiego, ma in parallelo ne appesantiscono in modo incisivo la gestione. Si tratta di una tendenza generale delle tecnologie informatiche e ICT in genere, ricorrente anche negli applicativi più comuni: si tende ad ampliare a dismisura le funzioni senza un'attenzione a gerarchizzarne la gestione. In pratica si tende a mettere sullo stesso piano di accesso funzioni comuni e ricorrenti e funzioni episodiche o di alta specializzazione. È un'impostazione che, se esasperata, penalizza l'approccio semplice e lineare richiesto dalla maggioranza degli utilizzatori quotidiani. Verso questa direzione, quindi, è opportuno sviluppare innovazione nei *software* di catalogazione per la gestione di immagini digitali e informazioni correlate, con un reale vantaggio della funzionalità d'impiego. Laddove invece prevalgono esigenze di studio piuttosto che di gestione, è la potenza dell'applicativo che interessa, al limite a discapito della semplicità di utilizzo, anche perché è prevedibile che questo tipo di applicativi vengano utilizzati da professionisti preparati. Tale è, ad esempio, il campo del *restauro virtuale* oppure quello delle *immagini ad altissima risoluzione*, dove si devono effettuare simulazioni complesse, gestire parametri cromatici, effettuare sovrapposizioni di immagini, confronti, misure metriche, estrazione di particolari, ecc..

Una esemplificazione significativa di implementazioni di non eccessiva complessità, in grado di favorire il settore dei BB.CC., riguarda il *monitoraggio previsionale* nel campo della *Conservazione*. È noto che, a causa del deposito del particolato sottile aerodisperso, soprattutto nei centri urbani, la maggioranza delle opere esposte in esterno (statue, modellati, facciate in pietra, facciate decorate) vanno inesorabilmente 'sporcandosi'. La manutenzione, operazione quanto mai auspicabile e invocata, stenta a divenire prassi a causa dei costi ancora elevati e per altre molteplici ragioni, fra le quali il fatto di non saper valutare, in assenza di aree pulite di riferimento, quanto le superfici di una statua o di una facciata siano effettivamente 'sporche' e quale sarebbe il guadagno estetico e il recupero dei valori tonali ottenibili attraverso un intervento adeguato. Per facilitare questo genere di valutazioni si richiede di effettuare riprese digitali di piccole aree pilota di pulitura (uno o due decimetri quadrati). Successivamente, attraverso un *software* dedicato da implementare, dotato di idonei algoritmi, confrontare queste riprese con quelle di aree confinanti non pulite, in modo da 'estrarre' i parametri digitali che identificano il velo grigiastro provocato dallo sporco. Con questo dato acquisito non risulta poi difficile 'pulire virtualmente' l'intero monumento sottraendo nella sua immagine i dati cromatici del velo grigio. Confrontando l'immagine del monumento 'sporco' con quella del monumento pulito virtualmente è possibile decidere se e quando intervenire con un'opera di manutenzione oppure di restauro.

Lo sviluppo di queste e altre possibili innovazioni nel campo delle immagini digitali a favore dei BB.CC. richiede una convergenza di programmi tra esperti dei BB.CC., imprese ICT e organi di ricerca specificamente competenti.

12. SISTEMI DI CLIMATIZZAZIONE E DI CONTROLLO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA IN AMBIENTI MUSEALI

Il problema della qualità dell'aria negli ambienti museali

In musei, gallerie, mostre d'arte, istituti di restauro, palazzi, chiese, ville storiche, negli ambienti in genere dove si espone e conserva il patrimonio culturale, si pone da sempre il problema di assicurare *condizioni ambientali* e *qualità dell'aria* idonee a garantire il mantenimento di uno stato fisico stabile degli oggetti. Il problema, in effetti, si pone da sempre, ma una reale presa

di coscienza di quanto le condizioni ambientali possano effettivamente incidere sui processi di alterazione e degrado di oggetti e reperti esposti, è cosa di non molti decenni fa.

Capita, anche a livello domestico, di osservare, ad esempio, come in giorni piovosi o di intensa umidità porte e finestre in legno possano presentare difficoltà di chiusura per il rigonfiamento che subiscono a causa dell'umidità. Il legno, infatti, è uno dei materiali più sensibili alle variazioni igrometriche. L'eccessiva umidità ne causa la dilatazione che avviene, prevalentemente, in direzione ortogonale alle fibre; ma, al contrario un'atmosfera secca può provocare spaccature e incurvature delle tavole lignee per effetto di contrazione. Il legno dunque, per non essere in uno stato di rischio, richiede tenori di umidità ambientali confinati in un *preciso intervallo di umidità*.

Dopo l'alluvione di Firenze (1966), le tavole lignee investite dall'acqua, dovettero essere collocate in luoghi protetti dove, con estrema gradualità, si cercò di ricondurre a normalità il tenore di umidità del legno, pena la perdita di capolavori unici, per le repentine contrazioni e conseguenti fessurazioni che altrimenti si sarebbero avute. Ma vi era anche il problema delle muffe, che in quella occasione fu affrontato con trattamenti biocidi. Più in generale, sappiamo, che l'elevata umidità espone gli oggetti costituiti da materiali organici al rischio del bio-degrado. Per affrontare questo problema, allora, sarebbe importante mantenere atmosfere quasi asciutte.

Anche i metalli richiedono atmosfere a basso tenore di umidità relativa (U.R.). I processi di corrosione, infatti, avvengono in presenza d'acqua, condizione che accelera in maniera esponenziale le cinetiche di reazione tra gas (l'ossigeno dell'aria) e solidi (i metalli). Gli oggetti metallici, dunque, richiedono intervalli di umidità relativa (U.R.), nell'ambito dei valori bassi. Per un oggetto polimerico, ad esempio, una statuetta in bronzo con un piedistallo originale in legno, qual è il comportamento più opportuno? Il buon senso suggerirebbe di adottare un ragionevole compromesso. I sali solubili, spesso contenuti in strutture antiche costituite da materiali porosi, tendono a rimanere in soluzione se la temperatura è alta e l'umidità è alta. Ma queste sono anche le condizioni climatiche per far proliferare la maggioranza dei microrganismi. Che fare? Abbassare U.R. e temperatura rischiando la cristallizzazione dei sali nei pori, con devastanti effetti di disgregazione? Oppure permettere a muffe e quant'altro di invadere i reperti? Potremmo effettuare trattamenti biocidi lasciando il microclima ai valori di sicurezza dei sali. Ma per quanto tempo potremmo ritrattare con biocidi, visto che questi perdono di efficacia nel tempo e devono essere periodicamente rinnovati? Sembra nuovamente che un compromesso sia la scelta più rispondente.

Oltre una determinata temperatura (indicativamente intorno ai 15°C per i tarli), le uova degli insetti, nei nostri climi, trovano difficoltà a schiudersi. Per evitare l'attacco di insetti xilofagi nel legno sarebbe logico rimanere al di sotto di questa temperatura, che è però manifestamente molto bassa. Ogni 10°C di aumento della temperatura, le reazioni chimiche mediamente raddoppiano la propria cinetica. Avremmo un altro valido motivo per tenere bassa la temperatura nei musei. Ma fino a che punto questo è possibile? I musei, i luoghi delle mostre, le chiese non sono vetrine di esposizione. Sono ambienti regolarmente frequentati da turisti, studiosi, visitatori, personale di custodia, fedeli. Molti edifici storici sono destinati a riuso e ospitano uffici, conferenze, manifestazioni pubbliche.

Questo preambolo ha infatti lo scopo di mettere subito in evidenza le diverse motivazioni che rendono sempre assai problematica l'individuazione delle soluzioni idonee al problema della climatizzazione degli ambienti di musei, palazzi, chiese, ecc.. Senza considerare che non si è ancora parlato di luce, polveri, inquinanti gassosi, microfibre apportate dalle vesti dei visitatori, flussi d'aria dei sistemi di condizionamento.

Prima di illustrare l'approccio tecnologico attualmente in uso per affrontare il problema della climatizzazione e del controllo della qualità dell'aria nei musei è importante considerare con attenzione gli effetti indotti dall'azione singola e combinata dei parametri di tipo fisico e di

tipo chimico sul patrimonio conservato. Ciò è utile per comprendere fino a che punto la risposta tecnologica è adeguata, dove si incentrano i punti critici e quali sono gli aspetti ancora carenti sui quali occorre impegnarsi e indirizzare la ricerca per migliorare le soluzioni a favore di questa azione cruciale della conservazione preventiva. Non dimentichiamo, infatti, che gli impianti di condizionamento nascono, storicamente, come risposta all'esigenza primaria di realizzare condizioni di comfort climatico e buone qualità dell'aria negli ambienti domestici e pubblici, per le persone che li frequentano, vi vivono o vi lavorano. L'attenzione ai BB.CC. avviene in un momento successivo e si porta spesso appresso il retaggio di un vizio di forma che è quello di venire incontro alle esigenze delle persone, piuttosto che degli oggetti. D'altra parte è anche vero che dove sono gli oggetti, sono anche le persone che ne fruiscono. È dunque nella ricerca del ragionevole compromesso, cui si accennava sopra che sta la difficoltà.

I parametri in gioco da controllare non sono molti: *umidità, temperatura, inquinanti gassosi, particellato atmosferico, particellato da visitatori*. Lasciamo al di fuori l'illuminazione, che pur costituendo un agente museale d'interazione con alcune tipologie di oggetti, è già stata in parte trattata nel capitolo dedicato all'illuminotecnica e non rientra direttamente nei sistemi di condizionamento. Ne faremo comunque un cenno in ultimo.

Temperatura e Umidità, in un ambiente confinato, sono i parametri climatici d'eccellenza. L'umidità viene espressa nella maniera più congrua, in riferimento ai fenomeni di interazione con gli oggetti, come U.R. (rapporto tra la massa di vapore d'acqua presente in un certo volume d'aria a una certa temperatura e la massa di vapore d'acqua che satura lo stesso volume alla stessa temperatura). U.R. e temperatura sono correlate. Per ogni valore di U.R. vi è una *temperatura di rugiada*, al di sotto della quale avviene la *condensa*. Un velo d'acqua liquida si deposita sull'oggetto, mutando rapidamente in negativo le condizioni di conservazione. Infatti, se l'oggetto è costituito da materiali compatti, come, ad esempio, un metallo, il velo d'acqua ristagna in superficie e favorisce processi corrosivi. Se invece è poroso, fibroso o spugnoso, l'acqua di condensa non è visibile perché viene assorbita all'interno del materiale, dove può innescare fenomeni di rigonfiamento, solubilizzazione e cristallizzazione di sali, sviluppo di microrganismi. La condensa (subdola talvolta, come si è detto, perché priva di segnali visibili) individua una delle situazioni microclimatiche a massimo rischio, a motivo dei processi citati. Il *clima asciutto* (ad esempio, valori di U.R. <35%) coincide con una seconda situazione di rischio molto elevato, che riguarda tutti i manufatti lignei, quelli lapidei porosi (pietre porose, affreschi, intonaci, malte in genere, ecc.) potenzialmente contenenti sali, e naturalmente il legno bagnato. Infine, una terza situazione di rischio elevato è quella del *clima caldo umido* (indicativamente, U.R. >85, T° >35), poiché determina condizioni ideali per la crescita della microflora. Tutte le altre condizioni climatiche, diverse da quelle ad elevato rischio citate, possono comunque individuare situazioni di minor rischio quando si allontanano troppo dai valori degli standard museali, caratteristici di ogni materiale. In uno specifico documento emanato nel 2001, il Ministero dei Beni e le Attività Culturali italiano ha stabilito i parametri degli *standard museali*. Per ogni tipologia materiale di oggetti vengono definiti gli intervalli di valori dei parametri ambientali entro cui è possibile realizzare condizioni di conservazione idonee sotto il profilo chimico-fisico, e per scongiurare l'attacco microbiologico. Ad esempio: *dipinti su tavola* (U.R. 50-60/ ΔUR^{\max} 2, T° 19-24/ ΔT^{\max} 1,5); *tessuti cellulosici* (U.R. 30-50/ ΔUR^{\max} 6, T° 19-24/ ΔT^{\max} 1,5); *manufatti cartacei* (U.R. 45-55/ ΔUR^{\max} 5, T° <21/ ΔT^{\max} 3). Per alcuni materiali in situazioni più critiche le condizioni sono ancor più stringenti: *bronzi archeologici con corrosione da cloruri* (U.R. <42); *ferri archeologici con corrosione da cloruri* (U.R. <20); *legno bagnato* (U.R. 100, T° <4). Al di là del rischio che si determina in coincidenza di determinati intervalli climatici, come si è ora visto, ve n'è un ulteriore che viene a crearsi a causa delle *oscillazioni dei valori climatici*. Al variare della temperatura e dell'U.R., la maggioranza dei materiali di cui sono

composti i manufatti si dilata o contrae a seconda dei propri coefficienti di dilatazione termica e di sensibilità all'umidità. Ogni materiale ha una propria inerzia in risposta alle oscillazioni termiche e igrometriche del clima. Quando queste sono molto veloci, l'inerzia, in genere, preserva i materiali da fenomeni di variazione dimensionale o da altri fenomeni chimico-fisici e biologici. Quando, all'opposto, sono molto lente, il materiale ha tempo di adattarsi per stati successivi di equilibrio, anche in questo caso con modesti effetti dannosi. A frequenze intermedie le fluttuazioni climatiche, tanto più se intense, possono indurre danni gravi e irreversibili a causa dell'accumulo per ripetizione ciclica. Determinano quindi un rischio importante. Per ogni materiale vi è un intervallo climatico specifico di maggior sicurezza, ma per tutti vale il principio, la buona pratica, di un *clima stabile*, al di là dei valori assoluti, a garanzia di un basso rischio. In definitiva si può, con un occhio attento ai valori parametrici degli standard museali e attenendosi al principio di un microclima quanto più stabile, venire sufficientemente incontro alle esigenze microclimatiche richieste per la salvaguardia dei manufatti esposti. Tutto ciò sottintende un progetto circostanziato, con un'analisi accurata della complessità del contesto e con l'obiettivo finale di individuare il compromesso più accettabile per conciliare le condizioni sicure per gli oggetti e compatibili con la fruizione. Risulta sempre problematico trovare soluzioni adeguate in presenza di oggetti polimerici oppure quando vi è compresenza di tipologie diverse di oggetti nello stesso ambiente. Per i casi più critici, tuttavia, rimane sempre la strada del ricovero in una vetrina, un ambiente confinato dove per ogni specifica esigenza è possibile calibrare il clima. Ancor più estrema è la soluzione di vietare la fruizione (vedi il caso della Grotta di Lascaux), riproducendo repliche che simulano gli originali. Dai parametri fisici veniamo ora a quelli fisici: la composizione dell'atmosfera, per quanto attiene i suoi componenti estranei. *Le emissioni gassose inquinanti* sono in prevalenza di natura acida: SO_2 (anidride solforosa), precursore dell'acido solforico ed NO_2 (ossidi di azoto), precursori degli acidi nitrico e nitroso.

Questi agenti (dei quali si è già accennato nella parte introduttiva), costituiscono un pericolo elevatissimo, come ampiamente dimostrato da una quantità di studi in letteratura, per i manufatti di natura *minerale carbonatica* (marmo, pietre calcaree, intonaci, affreschi, malte in genere, mosaici a tessere carbonatiche, stucchi ma anche patine verdi carbonatiche dei bronzi), a causa della diretta interazione che può instaurarsi tra i gas e gli oggetti, soprattutto se in presenza di elevati tenori di umidità, o peggio, di condensa. Il gesso è il prodotto prevalente che si forma dall'attacco corrosivo.

Una volta formato, in quanto sale solubile, esso diviene nuova indipendente causa di degrado per gli effetti di disgregazione connessi alla sua cristallizzazione ciclica. Gli inquinanti gassosi citati, in quanto acidi, sono pericolosi anche per altre tipologie di oggetti che temono l'acidità: ad esempio, manufatti cartacei e tessili soprattutto se in seta. Oltre a quelli citati, vi sono altri gas originati dall'inquinamento, presenti in misura minore: l'ozono O_3 (che ha una pronunciata azione ossidante, soprattutto verso i materiali organici), l'ammoniaca NH_3 , di natura basica, quindi interattivo con i gas acidi con i quali forma sali di ammonio (che sono dei nuovi inquinanti, ma di natura salina), l'acido solfidrico H_2S , che annerisce gli argenti per formazione di solfuro, l'acido cloridrico HCl , pericoloso per bronzi e leghe di rame nei quali innesca la corrosione ciclica. Insieme ai componenti gassosi, da sempre le atmosfere portano in sospensione del *particellato*, definito appunto *atmosferico*, di natura varia e complessa. Nei secoli passati, in epoca pre-industriale, le *polveri* sospese in aria, erano solo quelle *naturali*, che si formano per consunzione e sfarinamento delle rocce e della terra, e vengono sollevate poi dalle correnti atmosferiche. Si tratta in larga misura di materiali chimicamente inerti costituiti da silicati, materiali argillosi, carbonati, ossidi.

Sono polveri incoerenti di natura prevalentemente idrofila. A queste *polveri minerali* si aggiunge, in misura minore, ma in certi periodi dell'anno relativamente abbondante, il *particellato di origine*

organica, pollini, spore, semi minuti, frammenti vegetali, ecc., talvolta di natura idrofoba e con parziali caratteristiche appiccicose, ma di vita breve perché bio-decomponibile, a differenza del precedente. Con lo sviluppo industriale e il sorgere del fenomeno dell'inquinamento, una quantità di nuove particelle si sono aggiunte alle polveri naturali, purtroppo con effetti molto nefasti per il patrimonio culturale, rispetto al passato. La prevalenza di queste nuove specie è costituita da *sali solubili* (il gesso prevale, insieme a sali di ammonio, nitrati, ecc.). Sali solubili erano presenti anche nelle polveri naturali ma solo in vicinanza del mare (aerosol salmastri, con cloruri, ioduri, ecc.).

Oltre ai sali, vi sono componenti di origine idrocarburica, prodotti dal traffico, dal riscaldamento, dall'industria, dalle centrali. Sono *sostanze oleose e appiccicose* che favoriscono l'aggregazione dell'altro particellato e l'adesione alle superfici su cui si depositano. Una terza serie di componenti è costituita da sostanze insolubili, ad azione fortemente deturpante, in quanto *di colore scuro o nere*.

Tra esse prevale il carbone ma anche i prodotti di consunzione dei pneumatici, particolarmente nei centri urbani e soprattutto in vicinanza del traffico intenso. Il carbone ha anche una spiccata azione di catalisi sugli inquinanti gassosi che ne agevola la trasformazione in specie più aggressive.

Particelle colorate si ritrovano anche tra le polveri naturali, dovute a silicati e argille colorate, ma certamente con effetti assai meno importanti rispetto a quelle provenienti da inquinamento.

Un fattore abbastanza recente, infine, di cui occorre tener conto, è legato alle dimensioni medie del particellato, dimensioni che negli ultimi decenni sono andate modificandosi a favore dei componenti più fini appunto 'polveri fini'), più leggeri e quindi più a lungo permanenti in sospensione atmosferica. È un particellato a maggior 'azione sporcante', se così si può dire, in riferimento ai BB.CC., e difficile da rimuovere sia in fase di restauro che soprattutto di manutenzione. Infatti, pur essendo incoerente, non risulta facilmente eliminabile per semplice spolveratura o aspirazione in quanto, a motivo delle dimensioni, è fortemente ancorato e intrappolato nelle micro-discontinuità della rugosità superficiale. Per riassumere, le polveri in sospensione atmosferica, quando si depositano su oggetti e monumenti, sporcano le superfici, formano dure croste nere a causa della cristallizzazione ciclica del gesso che cementa insieme il particellato, nei materiali porosi entrano in forma di soluzione all'interno dei pori dove cristallizzano e generano sub-florescenze ad azione disgregante, rendono untuose e appiccicose le superfici, favorendo la fissazione del particellato. In altre parole sono causa di molti seri problemi sia sul fronte della conservazione che su quello della fruizione. In aggiunta al particellato atmosferico, nei musei e in analoghi luoghi di frequentazione di visitatori/fruitori di opere d'arte, l'aria è popolata di una ulteriore tipologia di particellato, che potremmo definire con neologismo *particellato museale*, in quanto abbastanza esclusivo proprio dei luoghi di frequentazione pubblica, primi fra tutti, giustappunto, i musei. Come è sotto gli occhi di tutti, il fenomeno della fruizione dei BB.CC. ha ormai assunto un andamento esponenziale.

Alcuni famosi musei, per la loro meritata attrattiva, e a causa della gestione dei flussi turistici imposti da agenzie e tour-operators, divengono luoghi-culto dove, in occasione della visita a una città, si deve 'assolutamente andare'. Il risultato è che il numero dei frequentatori va aumentando a dismisura. L'apporto di una tipologia di particellato molto leggero, di per sé relativamente inerte, costituito da *micro-frammenti di fibre* che si separano spontaneamente da vesti e indumenti dei frequentatori, sta determinando problemi nuovi, rispetto a quelli del particellato atmosferico, che si addizionano e complicano gli effetti di questo. Una lanugine voluminosa, resa appiccicosa dai componenti untuosi del particolato da inquinamento, tende a invadere gli ambienti di conservazione e a depositarsi sugli oggetti esposti. La leggerezza di questa tipologia di particelle, caratteristica condivisa dalle polveri sottili, fa sì che esse vengano trasportate dai moti convettivi degli impianti di condizionamento fino ad altezze inconsuete, rispetto al particellato tradizionale del passato, più grosso e pesante, andando a interessare superfici, oggetti o parti di essi che di solito non venivano interessati da deposito. Per fare un esempio, nella Cappella Sistina del Vaticano, noto e

frequentatissimo luogo, le lievi irregolarità di planarità delle pareti verticali affrescate, anche a discrete altezze, possono divenire sedi di accumulo preferenziale di questa lanugine leggera, ben evidenziabile in occasione dei restauri, con una luce radente.

Stato dell'arte e carenze nei sistemi di controllo dell'aria nei musei

I sistemi di controllo dell'aria negli ambienti confinati dei musei e dei luoghi di esposizione e conservazione dei BB.CC., nella situazione più generale, sono chiamati a soddisfare due obiettivi principali: il *condizionamento climatico* dell'aria che si immette in circolazione in funzione delle tipologie degli oggetti esposti e la *depurazione* dell'aria da specie dannose per la conservazione. Poiché i musei sono sistemi solo parzialmente confinati e sono frequentati da persone, sia le condizioni climatiche che la composizione dell'aria vanno in continua deriva rispetto ai valori ottimali che si intenderebbe assicurare. Ciò richiede la permanente correzione dei valori parametrici attraverso idonei *sistemi di condizionamento e di ripristino della qualità dell'aria*. La fruizione impone che l'aria da usare sia quella che arriva dall'esterno, con i suoi indispensabili componenti fondamentali, ma anche con l'insieme degli agenti estranei, chimici, fisici, biologici che abbiamo sopra illustrato. Un idoneo *impianto* dovrebbe essere costituito da: un *apparato collettore dell'aria esterna* d'obbligo per ragioni di ricambio, un *sistema di filtraggio dei componenti gassosi e del particolato*, un *sistema di climatizzazione*, un *sistema di immissione e diffusione dell'aria climatizzata e depurata nell'ambiente museale*, un *sistema di monitoraggio dei valori parametrici con trasmissione dei dati a una centrale di controllo*, un *sistema di ricircolo dell'aria* con transito ciclico attraverso i dispositivi di condizionamento e filtrazione per raggiungere rapidamente i valori ottimali imposti e mantenerli, un *sistema di espulsione dell'aria all'esterno*, una *rete di sensori per segnalare alla centrale eventuali malfunzionamenti e danni dell'impianto*, una *centrale di controllo*. Come ci si può rendere conto un impianto completo è complesso e di conseguenza notevolmente costoso (costi progettuali, delle apparecchiature e d'installazione, costi di esercizio, costi di manutenzione ordinaria e straordinaria). Ciò giustifica il fatto che la maggioranza dei musei italiani possiedono solo impianti parziali. La situazione più comune, quando non è possibile operare al meglio, è quella di soddisfare, prioritariamente, l'obiettivo della climatizzazione, rinunciando a controllare la qualità dell'aria, aspetto che si è visto, tuttavia, quanto sia importante.

Una situazione critica, sempre in connessione con la realtà italiana, viene anche dal fatto che la maggioranza dei musei italiani è ospitata in edifici di interesse storico. Ciò comporta notevoli limitazioni nella libera (e più razionale) progettazione di quella parte dell'impianto che è collocato nelle sale di esposizione, ovvero, i bocchettoni di immissione/diffusione e di uscita dell'aria.

La collocazione di queste aperture, soprattutto quelle di immissione, dovrebbe essere lontana dalle opere esposte per non investirle direttamente con il flusso d'aria. Anche per il confort dei visitatori si dovrebbe provvedere in maniera simile. I moti convettivi diretti, infatti, sono sempre da considerarsi negativamente. Essi favoriscono infatti il sollevamento in aria e il convogliamento verso le opere di quella parte del particolato neo-formatosi nell'ambiente (dagli accessi e per la presenza dei visitatori) che non è stato ancora eliminato attraverso il filtraggio e che rischia di depositarsi sulle opere. Ma i vincoli architettonici spesso non consentono la sistemazione più rispondente.

Orientamenti per l'innovazione tecnologica

Senza entrare in questa sede nelle questioni complesse dell'impiantistica che coinvolgono competenze dell'ingegneria termotecnica, elettronica, edile, e via dicendo, soprattutto a livello progettuale, si vuole quantomeno mettere in evidenza quelle carenze che nascono proprio dalle

esigenze dei beni esposti, spesso non ancora pienamente soddisfatte e non solo per carenza di risorse. Si è sopra accennato al fatto di non potere spesso sistemare le bocche di accesso e di uscita dell'aria nelle posizioni più rispondenti a causa dei vincoli architettonici che spesso si incontrano nei nostri musei e gallerie. Proprio per ridurre l'influenza di questo tipo di problemi verso opere e visitatori, i sistemi possono essere dotati di apparati diffusori atti a smorzare le correnti dirette e a re-indirizzare i flussi. Il miglioramento di questi sistemi di diffusione verrebbe in parte incontro a questo tipo di esigenza. Rimane il fatto, tuttavia, che anche quando porte di immissione e di emissione fossero razionalmente collocate, o convenientemente smorzate da efficaci apparati diffusori, il circolo dell'aria negli ambienti, indispensabile per rendere omogenei i valori dei parametri climatici nelle varie aree delle sale, comporta comunque lo sviluppo di flussi e moti convettivi. Ciò determina nei moderni musei un fenomeno per certi aspetti nuovo: il sollevamento continuo del particolato, cosa che non avveniva in passato quando i musei non erano climatizzati.

Tanto più che oggi, per quanto detto sopra, la popolazione del particellato urbano e museale tende ad arricchirsi di componenti sempre più fini e leggere, facilmente sollevate dai movimenti dell'aria anche ad altezze inconsuete rispetto al passato. Il risultato è che viene facilitata la permanenza delle particelle in sospensione aerea ed aumenta indirettamente la probabilità che esse vengano a contatto delle superfici dei manufatti e da essi fissate. Anche questo è dunque un fenomeno che andrebbe più a fondo studiato per individuare possibili soluzioni atte a contrastarlo. Un notevole problema è rappresentato dal mantenimento in efficienza del sistema di filtrazione. I filtri meccanici vengono periodicamente occlusi dalle particelle e quelli chimico-fisici (ad esempio a carbone attivo per gli inquinanti gassosi), saturati da gas e vapori. L'auto-pulitura dei filtri e la capacità di rigenerazione automatica, realizzata a costi contenuti, verrebbero incontro all'impegnativo compito di sostituirli quando sono esauriti, il che implica personale, costi di sostituzione e trasporto, rischio in caso di dimenticanza, di esposizione inconsapevole delle opere all'azione degli inquinanti che verrebbero ad accumularsi negli ambienti del museo. Il problema merita un'attenzione particolare.

Per concludere, vogliamo accennare alla possibilità (auspicabile) di disporre di sistemi passivi di abbattimento degli inquinanti, eventualità di grande interesse per risolvere a monte il problema. In tal senso, una promettente prospettiva sembra essere quella offerta dalle proprietà del biossido di titanio. Com'è noto, la letteratura recente ha messo in evidenza le interessanti capacità di questa sostanza di catalizzare la decomposizione degli agenti inquinanti, neutralizzandone così l'azione.

Vernici al biossido di titanio per rivestire intonaci di edifici sono già disponibili. Niente in teoria sembra ostacolare lo sviluppo di formulazioni di pitture da interni al biossido di titanio specifiche per il rivestimento di pareti di ambienti museali. Viene anche considerato l'uso di pannellature nanostrutturate al TiO_2 , in modo da aumentarne la superficie specifica interattiva e potenziarne l'attività di decontaminazione.

13. VETRINE DI ESPOSIZIONE MUSEALI

Significato ed evoluzione tecnologica delle vetrine di esposizione per oggetti d'interesse storico

Le vetrine di esposizione, che si ha occasione di osservare in alcuni musei d'impostazione moderna e soprattutto nelle mostre di opere d'arte, sono ormai divenute dei concentrati di tecnologia avvolti in involucri di raffinato design. Così non erano solo poche decine di anni fa; così non sono, ancor oggi in tantissimi - anche famosi - musei d'Italia e del mondo. Le vetrine tradizionali erano costituite per lo più in legno con uno o più fronti in vetro. Non erano a tenuta, per cui microclima e qualità dell'aria tendevano a uniformarsi ai valori esterni. D'altra parte, oggetti di alta qualità tecnologica e di raffinatezza formale, come le vetrine attuali, hanno costi non indifferenti e il mondo dei musei, perennemente afflitto da penuria di disponibilità economiche, ha difficoltà a

mettersi al passo. Ciò non toglie che l'obiettivo verso cui ogni museo e ogni luogo di collezioni tende è quello di raggiungere gli standard oggi disponibili, sostituendo, più o meno gradualmente, le antiquate e inefficienti vetrine con i moderni modelli. E questo rende conto del fatto che le vetrine di esposizione rappresentino nei BB.CC. un obiettivo di reale interesse economico da parte delle aziende specializzate nel settore, le quali da tempo si impegnano ad ottimizzarne le prestazioni e ridurne i costi. Le vetrine rispondono infatti a quattro potenti istanze dei BB.CC.: la conservazione, la fruizione, la valorizzazione e la sicurezza. Le vetrine, per propria natura, si prestano a soddisfare queste esigenze per oggetti di non grandi dimensioni, per lo più piccoli (gli oggetti piccoli sono anche più 'preziosi', in quanto meglio trafugabili) e solo più raramente, anche oggetti di grandi dimensioni. Pochi anni or sono il *Getty Conservation Institute* di Los Angeles è stato incaricato dall'Opificio delle Pietre Dure di Firenze di sviluppare il progetto di una mega-vetrina (di circa 2,5x5 m) con atmosfera inerte di azoto, per ospitare l'intera Porta del Paradiso del Battistero di Firenze, opera in bronzo dorato di Lorenzo Ghiberti. Il restauro è infatti in corso di ultimazione. L'impresa della vetrina si presenta titanica, non tanto per le dimensioni in sé quanto per ciò che le dimensioni comportano, soprattutto nella gestione in sicurezza del grande volume di gas inerte contenuto all'interno, soggetto a espansioni e contrazioni in funzione della temperatura.

Le vetrine di esposizione identificano il più tipico *ambiente confinato*. Lo spazio è racchiuso da ogni lato, il contenitore è quasi sempre a tenuta d'aria, il clima e l'atmosfera possono essere calibrati (in teoria) come è più opportuno. Anche i sistemi di sicurezza, in generale, possono essere progettati al meglio e altrettanto l'illuminazione. La vetrina appare, a prima vista, come il luogo ideale per conservare oggetti unici e irripetibili, come sono gli oggetti antichi, particolarmente se opere d'arte. Ovviamente non si hanno solo vantaggi. Vi sono anche dei limiti che nel computo generale definiremmo tuttavia minori. Nessun materiale trasparente e incolore, inorganico o organico (vetri speciali, plexiglas, polycarbonato) è mai così invisibile come l'aria. La forma del contenitore (squadrate, cilindrico, sferico) comporta sempre limitazioni all'osservazione, rispetto a un oggetto osservabile in modo diretto. L'atmosfera all'interno, e il microclima che ne è manifestazione, devono permanere quelli progettati. Una interruzione nella manutenzione o un guasto (sempre possibile), in assenza di efficienti sistemi di allarme, potrebbero esporre gli oggetti a condizioni climatiche inadeguate, al limite più aggressive di quelle esterne; la vetrina potrebbe trasformarsi in una 'trappola climatica'. A cose normali, tuttavia, le vetrine rispondono molto bene alle esigenze sopra citate e dunque, se non ideali, sono indubbiamente luoghi ottimali per la conservazione e la fruizione degli oggetti antichi. Originariamente, è probabile che le vetrine siano nate per rispondere ad alcune esigenze pratiche. I piccoli oggetti sono facilmente soggetti a furto. La vetrina - ancor prima che esistessero i sistemi di allarme - offriva un indubbio deterrente verso questo tipo di problema. Vi è poi il problema della *polvere* (oggi assai più critico che in passato). La vetrina annulla la necessità di spolverare gli oggetti (che in un museo possono essere veramente tanti). È vero che occorre spolverare la vetrina, ma questa è certamente un'operazione assai più semplice. Un'altra valida ragione può esser stata quella di evitare che gli oggetti venissero *toccati* dai visitatori. La tentazione, talvolta, può essere grande e il danno notevole. È possibile che inizialmente la questione del *condizionamento climatico* non sia stata determinante, sebbene sia immediatamente evidente che in un ambiente pressoché sigillato il clima è soggetto a fluttuazioni assai più contenute, non fosse altro che per l'inerzia del sistema. Dunque, sussistono ragioni importanti per decidere di esporre un oggetto, di per sé prezioso, piuttosto che libero in un museo, inserito in un contenitore adeguato dove possa essere osservato senza correre rischi gravi sul fronte della sicurezza e della conservazione. È probabile che la valorizzazione, oggi così dominante nelle finalità delle vetrine, all'origine, fosse lontana dall'esser considerata.

Stato dell'arte e carenze

Le *condizioni* che una vetrina deve garantire sono veramente molteplici, in risposta alle diverse esigenze che si pongono.

Per prima cosa, le *caratteristiche costruttive*. Si escludono a priori gli aspetti attinenti il *design* in quanto esulano dalla presente trattazione. Merita comunque osservare che, pur nella piena libertà creativa e stilistica in risposta agli importanti obiettivi della fruizione e della valorizzazione, il design è comunque subordinato alle esigenze rigorose della conservazione, della sicurezza e della salvaguardia. Per fare un esempio, per venire incontro a un'esigenza di sicurezza verso i visitatori, è preferibile che la vetrina sia progettata in modo da avere spigoli smussati, anche se questo potrebbe interferire con le scelte di design. La *solidità strutturale* è un primo fondamentale requisito attentamente curato dai progettisti per rispondere ai parametri di sicurezza/salvaguardia nei confronti di eventi catastrofici (sismi, alluvioni, ecc.), eventi accidentali (urti, incendi, ecc.), atti vandalici o atti criminali (furto, ecc.). La robustezza di una vetrina dipende non solo dalle qualità meccaniche dei materiali di contenimento (sia quelli trasparenti che quelli opachi) ma, in larga misura, anche dalle modalità costruttive che influiscono direttamente sulla solidità strutturale dell'insieme. Inoltre, non solo la vetrina, ma lo stesso sistema di fissaggio ai sostegni statici vengono progettati in modo da garantire piena stabilità. A maggior ragione ciò è necessario se si opta di avere *vetrine spostabili (su ruote)*, in risposta a esigenze di allestimento. Tra le caratteristiche costruttive occorre anche menzionare la *facilità di montaggio e smontaggio*, proprietà particolarmente importante soprattutto per le vetrine destinate a esposizioni temporanee, e di *accesso all'interno*, per consentire opere di manutenzione sia dei manufatti che degli impianti, per lo studio diretto degli oggetti, ecc. Ovviamente, la facilità di accesso è progettata in modo da risultare compatibile con i sistemi di sicurezza, e quindi sia con le *serrature* (occultate o a scomparsa) sia con i *dispositivi di allarme*. Nel progetto costruttivo vengono presi in considerazione gli aspetti inerenti alla qualità e alla rispondenza dei materiali, ai sistemi di controllo del microclima e della composizione atmosferica, ai sistemi di illuminazione, ai sistemi di sicurezza nei confronti dei diversi tipi di rischio, temi che vengono di seguito brevemente illustrati.

I *materiali costitutivi*. Uno o più lati del contenitore devono essere obbligatoriamente *trasparenti* e preferibilmente incolori e antiriflesso. Il vetro è certamente un materiale trasparente ideale, soprattutto per la permanenza nel tempo delle proprietà e per il fatto di non essere infiammabile.

Quanto al *colore*, alcuni materiali plastici trasparenti risulterebbero migliori (in quanto privi di ogni intonazione) rispetto al vetro di qualità standard, ma la tecnologia del vetro, con i cristalli, ha raggiunto ormai livelli così elevati da soddisfare ogni esigenza, ivi compresa quella delle proprietà incolori. Attraverso trattamenti specifici (ad esempio, depositi di ossidi metallici trasparenti per polverizzazione catodica) il vetro può essere reso *anti-riflesso*, con qualche lieve penalizzazione sulla quantità di luce che lo attraversa. Il vetro, se di opportuno spessore e idonea tipologia costruttiva, può essere realizzato in modo che abbia elevate qualità di robustezza (vetri di sicurezza multistrato), venendo così incontro alle esigenze di sicurezza. I materiali plastici trasparenti alternativi al vetro sono principalmente il poli-metil-metacrilato (Plexiglas) e il policarbonato. Essi soddisfano ottimamente i parametri della trasparenza e assenza di colore, e hanno costi certamente inferiori a quelli dei vetri speciali, ma riguardo ad altre proprietà (infiammabilità, resistenza al graffio, durabilità della proprietà incolore, ecc.) risultano inferiori. Vi sono ancora due aspetti importanti da considerare, che riguardano anche gli altri materiali della vetrina, quelli non trasparenti e di arredo (materiali del contenitore, tessuti sintetici, collanti, ecc.): l'*inerzia chimica* e la *bio-resistenza*. I materiali plastici vengono per lo più addizionati di agenti plastificanti, sostanze liquide alto-bollenti aggiunte al polimero, che possono rilasciare, comunque, quantità minimali di vapori. Questi, nell'ambiente chiuso di una vetrina, vengono ad accumularsi

nel tempo fino a raggiungere concentrazioni consistenti, divenendo potenzialmente reattivi verso i materiali costitutivi dei manufatti ospitati all'interno. Anche un materiale naturale come il legno, usatissimo in passato, presenta il problema del rilascio di sostanze volatili. Quanto all'esigenza della non infiammabilità dei materiali, la tecnologia mette oggi a disposizione affidabili trattamenti ignifughi, per i quali, tuttavia, occorre nuovamente che gli agenti ignifughi non rilascino (se non in maniera minimale) sostanze volatili. Per quanto detto, vetro e metalli non ossidabili (acciaio inox in particolare e, subordinatamente, alluminio anodizzato), sono tra i materiali più stabili, meno interattivi e non infiammabili tra quelli da utilizzare per le vetrine. Ovviamente, esigenze di arredo, di colore (tinteggiature), di adesione, comportano spesso l'impiego di altri materiali ausiliari, che possono risultare meno rispondenti. Allora, in assenza di alternative, si fa in modo di contenerne la quantità. L'altro problema è quello della bio-resistenza, ossia della resistenza dei materiali all'aggressione biologica. Un ambiente protetto con microclima statico, soprattutto se i valori di umidità non sono bassi (diverse tipologie di manufatti lo richiedono) è soggetto allo sviluppo di microrganismi. Il problema è affrontato in diversi modi. È conveniente, innanzitutto, procedere alla sterilizzazione preventiva della vetrina (prima di chiuderla e immettervi l'atmosfera adatta) e di tutti i materiali ausiliari e le strutture di arredo che contiene. È improbabile, tuttavia, che si possa effettuare anche la sterilizzazione dei manufatti, laddove questi siano costituiti da materiali bio-aggregabili. La sterilizzazione, infatti, comporta l'esposizione a radiazioni U.V. o il trattamento con idonei biocidi.

La prima via può risultare pericolosa per alcuni materiali costitutivi dei manufatti (coloranti, tessuti, sostanze organiche in genere), i quali, sotto esposizione U.V., sbiadiscono, ingialliscono e depolimerizzano. La seconda è invasiva: i trattamenti si eseguono solo in fase di restauro, per 'curare' una *patologia* ma non come provvedimento di conservazione preventiva. È comunque importante (ma non risolutivo) che i materiali stessi impiegati per la vetrina siano per quanto possibile non biodegradabili, perciò, se di natura organica, preferenzialmente sintetici.

Un'altra via è quella di adottare un'idonea composizione dell'atmosfera. Molti microrganismi (non però quelli aerobici) non proliferano in assenza di ossigeno. Con un'atmosfera in azoto, elio, argon, è possibile migliorare la situazione.

Atmosfera e Microclima sono parametri strettamente correlati. La vetrina, essendo un ambiente confinato ideale, offre condizioni ottimali per realizzare atmosfere e microclima rispondenti agli obiettivi di una conservazione preventiva. Tutto si fonda, tuttavia, sul poter garantire condizioni di isolamento affidabili. Questo può certamente essere realizzato ma non per tempi illimitati. Il grado di 'tenuta stagna' di un contenitore, che si misura in 'numero di ricambi di atmosfera per unità di tempo', è nuovamente una questione di costi. Più accurati sono gli accorgimenti costruttivi e la qualità dei materiali (materiali costitutivi, adesivi, sigillanti e guarnizioni), maggiore è la tenuta ovvero la sua durabilità. La composizione atmosferica trova ampia opportunità di regolazione all'interno di uno spazio chiuso e sigillato. Se si decide per un atmosfera particolare, diversa dall'aria, è richiesto un idoneo sistema di valvole di alimentazione e di spurgo. Come è noto, l'aria pura è composta principalmente da *ossigeno* (un gas reattivo per molti materiali) e *azoto* (un gas inerte); secondariamente, in percentuali assai minori, da *anidride carbonica* (un gas nella maggioranza dei casi inerte) e *vapore acqueo* (talvolta reattivo) e infine altri gas minori, inerti, presenti in tracce. A partire dalla società industriale, l'aria è venuta a contaminarsi di gas inquinanti aggressivi di natura acida (*ossidi di zolfo* e di *azoto*) e in misura minore da altri gas reattivi come l'*acido solfidrico* e l'*ammoniaca*. In sospensione vi è poi il *particellato* che oggi è aumentato di quantità e peggiorato in qualità contenendo componenti pericolosi per la conservazione (*sali solubili*, *sostanze scure deturpanti*, e componenti *oleosilappiccicosi*). L'influenza del particellato e dei gas inquinanti in una vetrina è tuttavia relativamente trascurabile poiché, anche se si usasse aria

comune, quindi contaminata, la quantità di inquinanti sarebbe minima mentre gli effetti dannosi provengono dall'accumulo o dal perdurare del contatto col manufatto, che cessano appena la vetrina viene chiusa. Meglio sarebbe, comunque, immettere aria decontaminata. Il problema, per alcuni materiali, può invece provenire dall'ossigeno, perché nell'aria è un gas concentrato. Si deve tenere presente, tuttavia, che i gas – ossigeno incluso – divengono interattivi con i materiali in presenza di acqua, quindi a valori elevati di umidità, situazione che si cerca di evitare. I metalli, ad esempio, con esclusione di quelli nobili oro e argento, non tollerano condizioni di umidità poiché i processi di corrosione avvengono in presenza di acqua. Per questo i manufatti metallici vengono conservati nelle vetrine a valori molto bassi o nulli di umidità relativa (U.R.). È buona norma, tuttavia, evitare anche l'ossigeno (ossia l'aria), sostituendolo con azoto o altro gas inerte. I materiali lapidei non sono ossidabili mentre quelli cartacei, tessili e in generale organici, subiscono lente e graduali alterazioni ossidative. L'acqua, come si è visto, gioca un duplice ruolo, di agente chimico (provoca reazioni di idrolisi, agisce da veicolo di reazioni varie) e di parametro fisico, in forma di umidità. *Umidità e Temperatura* sono i parametri caratterizzanti il microclima, almeno nell'ambito confinato di una vetrina, dove vento, pioggia e insolazione sono esclusi. La temperatura accelera tutte le reazioni chimiche, ivi comprese quelle degradative. Sarebbe perciò opportuno mantenere la temperatura nella vetrina a valori tendenzialmente bassi, tuttavia, salvo casi eccezionali costituiti da reperti altamente deperibili, come l'uomo di Similaun, alcune mummie, ecc., questo non viene realizzato poiché è sufficiente l'effetto del condizionamento climatico museale. La temperatura ambientale del museo, porta gradualmente a regime termico anche le vetrine ospitate al suo interno. Diverso e assai più critico è il discorso sull'umidità. Ogni materiale si conserva al meglio in un preciso intervallo di U.R., ben definito dalla normativa vigente. Già si è accennato alle esigenze dei manufatti metallici, che richiedono scarsa o nulla U.R., mentre gli oggetti costituiti da materiali organici, in generale, vengono conservati entro definiti e specifici intervalli di U.R.. Per realizzare e mantenere un determinato tenore di U.R. all'interno della vetrina, si fa affidamento, preferenzialmente, su sistemi passivi (tampone igrometrico, costituito da 'silica gel' amorfa pre-condizionata in granuli o, più raramente, miscele di sali vari). Questi sistemi richiedono manutenzione (ricondizionamento, sostituzione), per cui vengono alloggiati in appositi cassette estraibili, con lamiera metallica microforata in efficiente comunicazione con il vano degli oggetti.

Si noti, infine, la possibilità di realizzare atmosfere di gas inerti (ad esempio, azoto), assicurando contemporaneamente la presenza di U.R. a valori definiti, idonei. Questa combinazione rappresenta un valido sistema atmosfera/microclima.

Sicurezza e Salvaguardia, come già accennato, sono condizioni importanti da realizzare nelle vetrine attraverso idonei sistemi di controllo. Questi si differenziano a seconda dei vari tipi di rischio. Contro il *rischio d'incendio* si agisce innanzitutto in via preventiva, utilizzando finché è possibile materiali costruttivi non infiammabili e trattando quelli infiammabili con agenti ignifughi che non rilascino sostanze volatili. Si può fare poi affidamento su *sensori di temperatura* che innescano l'allarme al momento in cui si superano determinate soglie termiche. L'allarme può riguardare non solo il rischio d'incendio ma anche quello dovuto a un'eccessiva temperatura interna alla vetrina, non tollerata dagli oggetti conservati. Poiché le moderne vetrine sono ormai dotate di accessori elettrici di varia natura, quali sistemi di illuminazione, sensori elettronici per controlli vari, ecc.; il *rischio di guasto elettrico* è tra quelli da fronteggiare. Il guasto può interrompere il funzionamento delle strumentazioni, oppure determinare situazioni di danno potenziale quale generazione di sovratensioni, corto-circuiti, scintille, che a loro volta possono innescare incendi.

Nei confronti di queste evenienze, oltre a operare, di nuovo, a livello preventivo adottando circuiti elettrici affidabili, durevoli e di sicurezza, si può dotare la vetrina di specifici sensori che nel primo caso innescano l'allarme, nel secondo interrompono la corrente e mandano l'allarme.

Contro il *rischio di vibrazioni e di urto accidentale*, si è già detto all'inizio, in riferimento alle caratteristiche di solidità costruttiva e di stabilità di ancoraggio della vetrina ai sostegni fissi del sistema. Anche nei confronti di *furto e vandalismo* si interviene a livello progettuale col rendere la vetrina solida e stabilmente ancorata. In particolare, per oggetti di particolare valore vengono impiegati vetri blindati. Le accortezze costruttive citate, coniugate all'impiego di sensori di allarme sensibili alle manipolazioni che superino una certa soglia, concorrono a creare sistemi anti-intrusione, anti-sfondamento, antieffrazione. Per il *rischio sismico*, oltre ai sistemi di preallarme a carattere generale che interessano anche i settori della vita comune, valgono di nuovo i criteri della solidità costruttiva e della stabilità di fissaggio alle strutture fisse del sistema. Se gli oggetti sono fragili, di eccezionale valore e di una certa dimensione come alcune famose statue marmoree oppure preziosi oggetti di oreficeria, un sistema innovativo di protezione può essere l'utilizzo di sistemi tipo 'air-bag', capaci di avvolgere gli oggetti, ripararli dagli urti e attutirne le cadute in caso di sisma. Per le alluvioni, invece è importante, piuttosto, una efficiente tenuta stagna, che all'occasione è chiamata a funzionare all'inverso. A protezione delle varie tipologie di rischi sono stati quasi sempre citati specifici sensori. Nell'eventualità di allarme o comunque di superamento di certe soglie, si fa in maniera che i dati vengano trasmessi in tempo reale a un centro di controllo remoto.

Illuminazione. I sistemi di illuminazione delle vetrine museali fanno uso in larga parte delle tecnologie illustrate nella scheda dedicata alle 'Tecniche di illuminazione dei BB.CC.', tuttavia con alcune specificità. L'illuminazione può essere progettata esterna oppure interna alla vetrina, ma è evidente che la prima opzione, per molti aspetti legati a esigenze di conservazione dei manufatti ospitati, risulta preferibile. Le sorgenti di illuminazione destinate ai BB.CC., infatti, devono essere quanto più esenti da effetti termici correlati; così mentre una sorgente posta all'esterno, a una sufficiente distanza, quand'anche affetta da emissione termica, potrebbe risultare tollerabile grazie alla possibilità di dispersione del calore nell'ambiente esterno, ciò non sarebbe tollerabile all'interno della vetrina. Per un'illuminazione interna la soluzione ideale, sia sotto l'aspetto degli effetti ottici finalizzati alla valorizzazione, sia per quanto riguarda la conservazione e la sicurezza, è quella della luce emessa da sorgenti fredde a diodi convogliata dove serve, mediante fibre ottiche.

Orientamenti per l'innovazione tecnologica

Quanto è stato illustrato più sopra mette pienamente in evidenza il livello tecnologico che una vetrina di esposizione per oggetti storici e opere d'arte, progettata secondo moderni criteri, è in grado di raggiungere oggi. È altresì chiaro che la qualità dei materiali costitutivi e delle modalità costruttive, insieme al numero e alla sofisticazione dei dispositivi di controllo, e alla qualità del design, determinano un fattore-costi che oscilla in un ampio spettro di valori. Si può affermare, dunque, che la moderna tecnologia e la scienza del design sono in grado, oggi, di progettare e costruire vetrine da esposizione per i BB.CC. al meglio delle prestazioni, dell'affidabilità e della durabilità, ma che tutto questo ha una forte dipendenza dai costi. Un 'ventaglio' così allargato di possibilità sottintende *target* differenziati. Ma assai diversi fra loro sono anche gli oggetti che si conservano nelle vetrine, in relazione alle loro esigenze conservative ed espositive, legate, quest'ultime, ai loro valori artistici, storici, simbolici, di unicità, religiosi e quant'altro.

Considerando quindi il mercato di riferimento, affinché gli operatori aziendali possano disporre di criteri su cui basare i loro programmi di investimento progettuale, può aiutare un'analisi delle diverse esigenze in funzione delle categorie di utenti.

È comprensibile che i modelli di vetrine più attrezzati e sofisticati, e di conseguenza più costosi, siano destinati a pochi oggetti, specialissimi sotto l'aspetto conservativo o del valore intrinseco o di quello espositivo. Vi sono poi livelli di minore criticità ma caratterizzati da una

ricettività notevolmente maggiore, individuabili innanzitutto nei grandi musei, dove i manufatti da esporre richiedono l'impiego di vetrine. In quest'ambito, il grande numero di oggetti in gioco, sicuramente contribuisce all'abbassamento dei costi, senza che questo, verosimilmente, comporti una penalizzazione non sostenibile della qualità: un compromesso che sembra venire incontro sia alle aziende che progettano e producono vetrine sia ai loro potenziali clienti. Sarà poi compito dei curatori dei musei decidere se e fino a che punto rimanere nei costi privilegiando le esigenze della conservazione, della sicurezza e di una dignitosa fruizione rispetto a quelle della valorizzazione, la quale però è collegata all'importante parametro del numero dei fruitori. Una terza categoria è quella dei musei minori o meno abbienti per i quali si può individuare un terzo livello, in cui è presumibile si investa più sul fronte della fruizione ed eventualmente della sicurezza piuttosto che della valorizzazione. Vi è poi un ambito nel quale sono invece gli aspetti dell'estetica, del design, del gusto, su cui si punta, ed è quello delle mostre. Le esposizioni temporanee non possono non suggestionare il pubblico utilizzando al meglio le moderne tecnologie per la valorizzazione degli oggetti presentati e dunque, laddove occorrono, anche le vetrine di esposizione. D'altra parte, poiché le mostre sono spesso popolate da quantità di visitatori, con rischi conseguenti, anche le istanze della sicurezza devono essere garantite nel modo migliore. Utenze diverse, prodotti diversi, per bilanciare al meglio il rapporto necessità/costi.

La vetrina di esposizione è divenuta così un oggetto multi-tecnologico: le tecnologie incorporate in questi oggetti in prevalenza già esistono, e sono state singolarmente sviluppate per altri campi applicativi. Anche per questo settore, dunque, come per le tecniche d'illuminazione, il 'bisogno' si identifica nello sviluppo di una capacità di integrazione di diverse tecniche specialistiche, che richiede aziende con dimensioni e competenze elevate, in grado di rispondere alle richieste di un'utenza, generalmente abbastanza agguerrita. Il mondo della produzione e quello dell'utenza potrebbero vantaggiosamente avvicinarsi, se le aziende del settore si dimostrassero meno restie a rendere noti con chiarezza i dati tecnici che caratterizzano le loro forniture. La vetrina si identifica, fondamentalmente, nella dimensione di una progettualità capace di utilizzare in maniera intelligente le cognizioni e assemblare i dispositivi tecnologici che in larga parte già esistono sul mercato, in stretto rapporto con le esigenze dell'utenza.

14. TECNICHE DI ILLUMINAZIONE NEI BENI CULTURALI

Significato ed evoluzione tecnologica delle tecniche d'illuminazione

L'illuminotecnica è una moderna disciplina che studia e applica sistemi artificiali di illuminazione di vario tipo allo scopo, riferendosi ai BB.CC., di illuminare gli oggetti affinché, primariamente, possano essere adeguatamente *fruiti* quando è assente l'illuminazione diurna. Nelle tecniche di illuminazione degli oggetti d'interesse storico, artistico, architettonico e archeologico, tuttavia, va affermandosi sempre più anche una valenza di *valorizzazione*, che ha la finalità di "mettere in luce" valori delle opere solitamente non percepiti, proporre prospettive di osservazione inedite, esaltarne i messaggi di cui sono portatrici. Sempre in riferimento ai BB.CC., la scienza dell'illuminazione si rapporta anche con problemi di *conservazione*, poiché la luce è una forma di energia che, sebbene di debole entità, può indurre alterazioni e accelerare il degrado di alcuni materiali costitutivi dei manufatti antichi.

I sistemi di illuminazione hanno subito cambiamenti epocali da quando la tecnologia ha messo a disposizione della società soluzioni rivoluzionarie quali, non tanto le prime sorgenti a gas, rimaste in uso per un periodo relativamente breve, quanto le sorgenti alimentate elettricamente.

La prima lampadina a filamento incandescente è stata "accesa" da Thomas Alva Edison nel 1878, sebbene già nel 1854 Heinrich Goebel ne avesse formulato il progetto. L'illuminazione con

sorgenti ad alimentazione elettrica aveva fatto la sua comparsa agli inizi dell'800 con le lampade ad arco, ma la vera diffusione è avvenuta dopo le esperienze di Edison, a partire dalla fine del secolo. Prima di allora, dall'origine stessa della civiltà, le fonti di illuminazione si basavano sulla combustione di materiali di origine naturale facilmente reperibili, come gli oli, la cera d'api, i bitumi, e successivamente, il petrolio. Torce, lampade a olio, candele hanno giocato un ruolo determinante per un periodo estremamente esteso della storia dell'umanità, condizionandone sotto molteplici aspetti (pratico, psicologico ed emotivo) la percezione del mondo che ci circonda nelle ore dell'oscurità notturna. Le luci artificiali a combustibile naturale non possono certamente competere con la qualità che caratterizza le moderne luci artificiali ad alimentazione elettrica. Più avanti si entrerà in dettaglio sul significato e sul ruolo dei diversi parametri che condizionano l'illuminazione, ma già da ora vale la pena fare dei semplici confronti mentali, ad esempio, tra la quantità di luce e la tonalità delle luci consentite dai moderni sistemi di illuminazione con quelle di torce, lampade a olio e candele. Non è senza significato ripensare alle effettive limitate possibilità disponibili in passato di illuminare città, edifici, statue, affreschi, dipinti, arazzi, disegni, bronzi, ecc., paragonandole a quelle di oggi. Viene immediatamente all'attenzione un aspetto delicato che verrà meglio esaminato più avanti: fino a che punto la nostra percezione attuale degli oggetti e dei monumenti viene modificata dai moderni mezzi di illuminazione rispetto all'aspetto primitivo, originale con cui essi vennero concepiti per esser osservati sotto quelle luci? È un quesito su cui riflettere.

I parametri che caratterizzano una sorgente di illuminazione non sono molti ma sono in grado di influenzare potentemente l'aspetto degli oggetti. Possono essere così riassunti: *qualità della luce emessa* (ossia *temperatura di colore* e, più in generale, *composizione della luce*), *quantità della luce che investe l'oggetto (illuminamento)*, *distribuzione della luce sull'oggetto* (puntiforme, distribuita, diretta, diffusa), *angolazione del fascio luminoso rispetto alle superfici dell'oggetto*, *staticità o dinamicità delle sorgenti rispetto ai soggetti illuminati*.

Prima di chiarire cosa si intende per *composizione o tonalità della luce*, è opportuno ricordare, innanzitutto, che l'occhio umano è sensibile solo a una piccola banda delle radiazioni elettromagnetiche, quella con lunghezze d'onda comprese tra circa 0,4 e 0,7 μm (o tra 400 e 700 nanometri), un insieme di radiazioni che chiamiamo appunto *luce*. Al di là di questo intervallo la retina umana è insensibile. Certi insetti, dotati di una sensibilità estesa nella regione ultravioletta (un differente intervallo che si colloca nella regione al di sotto di 380 nm di lunghezza d'onda), percepiscono in alcuni fiori disegni per noi invisibili. La *temperatura di colore* è una grandezza termica, che si misura in gradi Kelvin ($^{\circ}\text{K}$), ma che di fatto esprime la qualità di una luce, la sua tonalità. Essa fa riferimento all'insieme di radiazioni emesse, ciascuna con la propria intensità, da una sorgente luminosa con uno spettro di emissione continuo e, sebbene le sorgenti artificiali non siano di solito continue, viene comunque adottata come termine di misura. Nella *luce diurna* le diverse radiazioni nell'intervallo visibile hanno intensità relativamente elevate e tra loro abbastanza simili (nessuna prevale e nessuna è debole o assente). Si parla anche di luce *bianca*, dove "bianco" è la denominazione che si dà alla sensazione di saturazione che l'occhio percepisce. Le sorgenti in cui vi è disomogeneità nelle intensità delle diverse componenti, sono *luci intonate*. Tali sono la maggioranza delle luci artificiali. Se si confrontano simultaneamente oggetti illuminati da luci artificiali con oggetti all'esterno, esposti alla luce diurna, i primi appaiono per lo più di tonalità giallo calde. In assenza, invece, di un riferimento di confronto, un oggetto bianco in luce diurna sembra comunque bianco anche sotto una lampada di tonalità giallastra. Di fatto, l'occhio registra colori alterati rispetto a quelli della luce diurna ma il cervello (finché può) cerca di compensare la nostra percezione visiva per mantenere le capacità percettive quanto più costanti, ossia a noi familiari. Le tonalità delle sorgenti artificiali disponibili appaiono in maggioranza giallastre o

giallo-rossastre, poiché sono povere o prive delle componenti della luce con lunghezze d'onda minori, a partire dal violetto, il blu, ecc.. La luce diurna ha una temperatura di circa 5400 °K; le candele poco meno di 2000 °K, mentre le lampade a incandescenza tra i 2400 e i 3000 °K. Le lampade a fluorescenza possono avere temperature di colore più vicine a quelle della luce diurna, variando da 2900 a 6500 °K. La citata capacità del cervello di compensare la percezione psichica dei colori anche quando si osservano oggetti con sorgenti luminose di temperatura di colore diverse da quella della luce diurna, non è illimitata e questo è un fattore importante di cui tener conto nelle applicazioni ai BB.CC.. Ad esempio, se in un dipinto si osserva una vegetazione verde con una sorgente artificiale ricca di componenti rossastre (tono complementare al verde), la vegetazione appare scura, se non addirittura nera. Il cervello infatti fa fatica a compensare. Simile è il risultato in situazioni analoghe: ad esempio nel caso di un soggetto viola osservato con luce arancione (complementare al viola): nuovamente esso sembra innaturalmente scuro.

Per contro, una campitura gialla, osservata con una luce di tonalità altrettanto gialla ci appare pressoché bianca poiché il soggetto riflette praticamente tutte le componenti della sorgente. Nei casi esaminati, le qualità cromatiche di un soggetto vengono pesantemente alterate da una *qualità della luce* inappropriata. È comprensibile che questo non sia consentito nel campo dei BB.CC.. Per concludere, pur essendo oggi possibile variare la tonalità di una sorgente luminosa con grande libertà, l'illuminotecnica quando opera nei BB.CC. deve sempre tener conto del pericolo di provocare effetti falsificanti non accettabili, soprattutto in presenza di soggetti policromi. Anche sotto l'aspetto conservativo, occorre consapevolezza. L'uso di sorgenti ad elevata temperatura di colore non è tollerato su manufatti con materiali costitutivi fotosensibili. Questi sono soprattutto i coloranti organici naturali usati in arazzi e tessili, ma impiegati in forma di lacche organiche anche in dipinti su pergamena, carta, tavola e tela; in misura assai minore, in affreschi. Le componenti luminose ricche di energia, blu, violetti e ancor più gli ultravioletti, assolutamente da escludere, causerebbero in questi materiali effetti dannosi di sbiadimento. Per queste tipologie di oggetti, l'orientamento è pertanto quello di un utilizzo di sorgenti a bassa temperatura di colore. E infine anche la temperatura che caratterizza certe sorgenti risulta intollerabile per molti materiali a essa sensibili.

La *quantità di luce* che investe un determinato soggetto (*illuminamento*, espresso in *lumen*) non dipende, ovviamente, solo dall'*intensità* della sorgente (che si esprime in *candele*) ma anche dalla collocazione reciproca sorgente/soggetto, ossia dalla distanza tra l'una e l'altro nonché dall'angolo di illuminazione (ossia dalla direzione del fascio luminoso rispetto a una determinata superficie del soggetto), all'essere la luce diretta o diffusa. Questo parametro è evidentemente correlato alla sensazione di *soggetto più o meno illuminato*, sensazione normalmente recepita quando si osservano oggetti investiti da una sorgente luminosa. Un eccessivo illuminamento può provocare un effetto di abbagliamento, una sensazione di luce bianca che si sovrappone ai colori, li appiattisce e ci impedisce di percepirli. Uno scarso illuminamento, suscita invece una sensazione di scuro che, nuovamente, penalizza la dinamica dei colori. Si deduce che i colori, così importanti nelle opere d'arte, si apprezzano interamente solo quando la quantità di luce che investe un soggetto varia in un campo di valori commisurato alla sensibilità dell'occhio umano, in termini più semplici, quando è nella normalità. Di ciò, ovviamente, si deve tener conto nel progettare sistemi di illuminazione per i BB.CC.. Oltre che a una esigenza di corretta fruizione, la quantità di luce che arriva su un oggetto è anche correlata - come si è già visto per la temperatura di colore - alla conservazione. Non solo la qualità, ma anche la quantità di luce può risultare 'aggressiva' per alcuni materiali costitutivi. I motivi di ciò sono gli stessi. Per ragioni diverse, infatti, in entrambi i casi, è l'energia che risulta eccessiva rispetto alla tolleranza di certi materiali costitutivi fotosensibili (quelli già sopracitati), che ne potrebbero risultare danneggiati.

La *distribuzione della luce sull'oggetto* ha importanza sia sotto l'aspetto della fruizione che sotto quella della valorizzazione. Il fascio di luce, a seconda del tipo della conformazione della sorgente, della distanza dal soggetto, dell'interposizione o meno tra sorgente e oggetto di mezzi semitrasparenti ad azione diffondente, può variare da distribuito a localizzato, da diretto a diffuso.

L'aspetto dell'oggetto illuminato cambia alquanto nei diversi casi. Una *luce distribuita* tende a illuminare uniformemente il soggetto senza creare in esso zone luminose contornate da periferie scure, cosa che invece si realizza con una *illuminazione a spot*, dove il fascio di luce che arriva sul soggetto, di dimensioni più piccole di esso, ne illumina solo una parte. Si tratta di effetti tra loro assai diversi che rispondono a esigenze e a obiettivi diversi, di semplice fruizione o di valorizzazione. È ovvio infatti che l'illuminazione *a spot*, per sua natura, tende a creare suggestioni ottiche, a privilegiare parti del soggetto ritenute più interessanti, espressive e comunicative, rispondendo quindi soprattutto a un'istanza di valorizzazione. Si tratta di un tipo di illuminazione che può trovare applicazione nel caso di opere tridimensionali (statue, architetture, bassorilievi), e che risulta normalmente inadatta per i dipinti, dove, se impiegata, rischia di generare alterazioni arbitrarie del messaggio espressivo. Peraltro essa è frequentissima, anche in pinacoteche, sia perché conseguente a generica trascuratezza nel progettare l'assetto museografico, sia, più spesso, per il fatto che le alternative più appropriate risulterebbero anche più costose e complicate. Per contro, un'illuminazione ben distribuita rispetta *in toto* i valori ottico-espressivi del soggetto, non ha generalmente intenti di valorizzazione, ma di normale fruizione. È certamente consigliabile per l'illuminazione artificiale di dipinti ma è impiegata anche per opere tridimensionali. Si è detto poi che la luce può essere *diretta* o *diffusa*, utilizzando in questo secondo caso schermature semitrasparenti ad azione diffondente o anche dirigendo la luce anziché direttamente sul soggetto, su schermi riflettenti nelle sue vicinanze. Anche sotto questo aspetto gli effetti ottici indotti sul soggetto sono comprensibilmente diversi. Un fascio luminoso diretto, senza schermature, genera un aspetto più *crudo*, ossia caratterizzato da ombre più nette a contorno dei rilievi. Una luce schermata da mezzi diffondenti interposti o riflettenti, crea un senso di morbidezza, con passaggi chiaroscurali più gradualmente nei rilievi del soggetto. Le schermature possono essere realizzate in molteplici modi, ad esempio, con tessuti sintetici semi-opachi a tessitura fine, lastre di vetro smerigliato, pannelli bianchi, ecc..

Un ulteriore parametro che viene qui considerato è quello dell'*angolazione tra il fascio luminoso e le superfici del soggetto da illuminare, in riferimento alla posizione dell'osservatore*. Una situazione estrema si ha con la *luce radente* che si realizza con un fascio molto angolato rispetto al soggetto, generalmente inferiore a 30°. Questo tipo di illuminazione esula in generale dal campo dell'illuminotecnica, poiché ha finalità di studio piuttosto che di fruizione o valorizzazione. La luce radente è infatti comunemente impiegata per mettere in evidenza, amplificandoli, rilievi minimali della superficie, come le tracce delle pennellate in un dipinto, la discontinuità dalla planarità in un affresco, la cristallizzazione di sali su superfici d'intonaco o su manufatti lapidei, lacune del tessuto pittorico, rugosità delle superfici dovuta a corrosione, ecc.. È quindi quello che si definisce un mezzo diagnostico. Eccezionalmente, viene impiegata anche a fini di valorizzazione, per mettere in evidenza, suggestivamente, la *texture* di un materiale.

All'altro estremo, la posizione del fascio luminoso ortogonale al soggetto, risulta spesso inadatta per una somma di ragioni. Innanzitutto, questa angolazione è chiaramente incompatibile quando sorgente, osservatore e soggetto si trovano più o meno allineati, venendo ostacolata l'illuminazione stessa. Ma vi sono altri motivi, legati alla riflettanza della superficie. Alcuni oggetti hanno superfici lucide, ad esempio un dipinto verniciato. Il termine 'lucido' è riferito alla capacità delle superfici materiche di riflettere specularmente la luce. Con superfici molto lucide si corre il rischio che

l'osservatore venga abbagliato dalla riflessione speculare della sorgente stessa, quindi da una luce intensa e biancastra, che ostacola la visione e la percezione dei colori. Oggetti con superfici micro-rugose, invece, riflettono la luce in maniera 'diffusa', ossia in tutte le direzioni rispetto a quella del fascio incidente. Vengono definite *mat*. Una superficie perfettamente *mat* è osservabile da qualsiasi direzione senza problemi, ma la maggioranza degli oggetti hanno superfici con proprietà riflettenti intermedie, tra lucido e *mat*, e possono perciò dar luogo a inconvenienti di maggiore o minor riflessione della sorgente. In generale è buona regola evitare tutte quelle angolazioni fascio-soggetto che portano la sorgente in condizioni di riflessione speculare rispetto all'osservatore (angolazione di incidenza uguale a quella di riflessione). Le angolazioni del fascio più convenienti, in riferimento sia all'osservatore che alla superficie da illuminare, sono quelle che escludono sia la luce radente sia le angolazioni prossime all'ortogonalità, come quelle comprese tra 45 e 75 gradi. Se la superficie da illuminare è estesa, allora è probabile che una sola sorgente non sia sufficiente per un'illuminazione uniforme. Occorre allora un *sistema di illuminazione*, costituito da più sorgenti, situazione frequentissima in caso di superfici architettoniche, affreschi, siti archeologici. Tutto diviene comprensibilmente più complesso e occorre un *progetto* specifico per far sì che per nessuna delle sorgenti l'osservatore si trovi in posizione di riflessione.

Recentemente vanno sperimentandosi forme di illuminazione non comuni nei BB.CC., che prevedono il *movimento della sorgente (o delle sorgenti) rispetto all'oggetto*, un'illuminazione, quindi, non statica ma dinamica. Nei progetti di illuminazione per i BB.CC. è innanzitutto importante non dimenticare che si opera su oggetti assai particolari per i quali valgono principi di rispetto dei valori, di gusto e di moderazione. Non si dispone quindi di quei gradi di libertà e di quelle soluzioni creative che sono talvolta assai valide in altri settori ma che risulterebbero arbitrarie in questo. Ciò non significa che si debbano rifiutare a priori approcci innovativi purché questi rispondano sempre a criteri di valorizzazione, nel significato che è stato definito nella prima parte di questo scritto. La movimentazione di un fascio luminoso diretto verso un oggetto d'arte, se utilizzata con accortezza, è un'opzione che può portare a risultati nuovi e interessanti ai fini della valorizzazione. È rivolta, ovviamente, a oggetti tridimensionali (statue, architetture, ecc.) per i quali, quando si opta per una illuminazione direzionata, si è già fatta una scelta di valorizzazione, piuttosto che di fruizione. Quando invece si opta per un'angolazione piuttosto di un'altra, questa rimane di solito permanente nel tempo, anche per ragioni di praticità oltre che di costo. Ma non è detto che le altre direzioni d'illuminazione siano tutte scadenti o negative. La movimentazione del fascio offre l'opportunità di svincolarsi dall'angolazione statica e di variare, in tal modo, l'aspetto dell'opera mettendone in luce i diversi valori plastici. Ovviamente tempi di movimentazione e spettro delle angolazioni devono essere attentamente calibrati. Vi sono due ulteriori parametri dell'illuminazione che non hanno alcun riferimento con l'aspetto dell'oggetto ma con altri fattori. La *temperatura* della sorgente luminosa (da non confondere con la temperatura di colore) risulta critica in alcuni contesti. Ciò si verifica soprattutto in ambito museale e particolarmente quando si trattano oggetti chiusi nelle vetrine di esposizione. Quanto più l'ambiente è confinato e quanto più la sorgente è vicina all'opera, tanto maggiore è il rischio, con l'utilizzo di sorgenti calde, di determinare stati termici pericolosi per la salvaguardia materica degli oggetti stessi. L'aumento di temperatura accelera in maniera assai notevole le reazioni chimiche, ivi comprese quelle legate ai processi di degrado. In funzione, dunque, di quanto detto (ambiente confinato e vicinanza della sorgente) nonché del tipo di materiale costitutivo (alcuni sono più sensibili agli effetti termici di altri), occorre o allontanare la sorgente o ricorre alle cosiddette 'sorgenti fredde'. Oggi la tecnologia mette a disposizione gli uni e gli altri, con fari che generano fasci collimati collocabili anche a considerevoli distanze dal soggetto, e con sorgenti di luce (vedi più avanti) non associate (o poco) a emissione termica. L'altro parametro è quello dei costi. Non ci si riferisce, qui, ai costi di

investimento, quanto piuttosto a quelli di *esercizio* dei sistemi di illuminazione. Sorgenti luminose diverse hanno consumi di energia anche assai diversi. L'illuminazione che si protrae per ore e ore, in un museo, una mostra, un sito archeologico, un palazzo o un monumento in area urbana, accumula costi di esercizio notevoli per i quali occorre individuare soluzioni economicamente sostenibili, tanto più nell'ottica odierna che impone in ogni attività, e maggiormente in ambito pubblico, una politica di *risparmio energetico*. È noto, anche a livello domestico, che sotto questo aspetto la tecnologia offre oggi soluzioni innovative di assoluta convenienza rispetto al passato, sia per quanto riguarda le sorgenti di illuminazione (luci a basso consumo) sia in riferimento alle fonti di alimentazione (pannelli solari, ecc.).

Stato dell'arte e carenze

L'illuminazione si fonda su *sorgenti di luce* e su *sistemi di illuminazione*. Sorgenti e sistemi (ovvero assetto delle sorgenti) consentono di rispondere alle esigenze che si pongono in un determinato contesto e determinano la rispondenza dell'effetto d'illuminazione. Qui di seguito si traccia una rapida panoramica delle moderne *sorgenti di luce artificiale*. Esse appartengono a un certo numero di tipologie che si differenziano per il principio su cui si basano, per la qualità della luce emessa, per l'efficienza (rapporto lumen/watt, connesso al consumo di energia), per il costo, per la durata, prima che avvenga il decadimento del flusso, per la temperatura di esercizio.

Le *lampade a incandescenza* si basano sul riscaldamento, provocato dal passaggio di corrente per effetto Joule, di un filamento metallico conformato a spirale posto all'interno di un bulbo di vetro. Se nel bulbo vi è il vuoto o un gas inerte abbiamo le *lampade a filamento di tungsteno*. Se invece il bulbo è riempito di un gas alogeno si hanno le *lampade alogene*.

Le *lampade a filamento di tungsteno* sono tra le sorgenti più tradizionali di luce elettrica. Fino a tempi recentissimi (e in parte tuttora) hanno costituito la fonte di luce artificiale più diffusa, soprattutto in ambito domestico. Il tungsteno è un metallo resistente al calore che all'interno del bulbo viene fatto assumere temperature entro i 2700 °K, soglia oltre la quale ne avviene in maniera rilevante la sublimazione (passaggio allo stato di vapore). La presenza di un gas inerte (come l'Argon) riduce la sublimazione. L'efficienza (circa 20 lm/w) e la durata (circa 1000 ore) risultano relativamente basse. La tonalità della luce è calda e le lampade hanno il vantaggio di una accensione istantanea; hanno però notevole emissione termica. Nelle *lampade alogene* il bulbo contiene gas - come lo iodio, il cloro, il bromo - che determinano un ciclo rigenerativo del filamento (i vapori di tungsteno si ridepositano sul filamento, piuttosto che sulle pareti del bulbo).

Il riscaldamento può esser così portato a valori più elevati e la temperatura di colore raggiunge valori fino a 3300 °K, quindi una luce più bianca di quelle a filamento di tungsteno. Sono anche dotabili di riflettori parabolici o coppe riflettenti interne al bulbo che ne ottimizzano l'efficienza e la direzionalità del fascio. Ne esistono a bassa e ad alta tensione. Hanno maggiore durata rispetto alle precedenti (circa 3000 ore) ma anche costi più elevati. Hanno emissione termica notevole ed emettono raggi U.V. (sebbene in parte filtrati dal vetro stesso), fenomeni che possono risultare entrambi dannosi per alcuni materiali dei BB.CC.. Nelle *lampade a scarica* la luce è prodotta da un gas ionizzato (plasma) per effetto di una scarica elettrica. Esistono a bassa e ad alta pressione.

Si suddividono in *lampade fluorescenti*, *ad alogenuri metallici*, *a vapori di sodio*, *al sodio-xeno*. Nelle prime (*lampade fluorescenti*) il tubo di vetro è riempito di gas come l'argon o il neon addizionati di piccole quantità di mercurio i cui vapori, eccitati tramite due (o più) elettrodi per l'innesco, emettono radiazione U.V.. Questa rende fluorescenti delle polveri che rivestono le pareti interne del tubo. Necessitano di attrezzature ausiliare per l'innesco (starter, condensatori, ecc.), che nelle versioni di ultima generazione sono incorporate nella lampada che si presenta col normale attacco a vite. Sono molto più efficienti delle alogene (circa 4 volte tanto) e hanno una

durata dalle 8 alle 20 volte superiore a quella di una lampada a incandescenza. Si prestano a essere dirette in maniera localizzata sul soggetto. La qualità della luce non è eccellente e i costi d'acquisto sono assai più elevati delle lampade a incandescenza ma sviluppano poco calore. Nelle *lampade ad alogenuri metallici*, all'argon e al mercurio vengono aggiunti sali di alogeni che migliorano alquanto la composizione della luce inserendo righe spettrali di cui il mercurio è privo. Hanno alta efficienza, grande potenza luminosa e una buona resa dei colori sebbene con una discreta qualità della luce. Hanno però tempi lunghi di accensione e non possono essere riaccese subito dopo lo spegnimento.

Le *lampade a vapori di sodio* a bassa pressione risultano monocromatiche (gialle) e quindi inadatte ai BB.CC.. Quelle ad alta pressione emettono una luce più bianca ma sempre affetta da sottotoni sul giallo. Per questo hanno un impiego limitato, eventualmente integrativo di altre sorgenti o di compensazione. Le *lampade al sodio-xeno* ad alta pressione, combinando gli spettri di eccitazione di entrambi gli elementi, sono in grado di generare una luce abbastanza bianca di alta qualità e ben armonizzata, non dissimile da quelle a incandescenza. Sono lampade efficienti ed economiche nel costo e nell'esercizio e rappresentano quindi un buon compromesso. La richiesta di *lampade a luci fredde* (nel senso termico, non della temperatura di colore) ha cominciato a essere soddisfatta con l'invenzione dei LED (*Light Emitted Diode*).

Il LED (prima apparizione nel 1962) è un diodo (un componente elettronico), che, percorso da corrente, emette una radiazione luminosa nell'I.R. o nel visibile (fenomeno della elettroluminescenza). L'emissione di luce tuttavia non è associata, a differenza delle altre sorgenti, a emissione di calore. Per un lungo periodo i LED disponibili commercialmente sono stati emettitori di luci pressoché monocromatiche nel rosso, nell'arancio, nel giallo nel verde. Nel 1996 fa la comparsa il LED bianco. In tempi ancor più recenti, anche i LED hanno potuto accedere al campo dell'illuminotecnica grazie a un'ulteriore conquista tecnologica, i LED ad alta efficienza o PowerLED, con potenze variabili da 1 a 5 W e con temperature di colore comprese tra 2800 e 3800 °K ma anche di 5500 °K. Questo prodotto di alta tecnologia (consumo veramente basso, luce bianca, bassissima emissione termica, intensità luminosa elevata, notevole efficienza, lunga durata) si prospetta, come è facile comprendere, estremamente interessante proprio nell'ambito dei BB.CC. e soprattutto per l'impiego nelle vetrine di esposizione, dove l'accumulo di calore dovuto all'illuminazione è un problema. I LED (ma anche altre sorgenti luminose), vengono spesso accoppiati a fasci di fibre ottiche. Lo scopo è quello di 'canalizzarle' la luce, con minime dispersioni in maniera precisa e flessibile, verso siti di diffusione dai quali si possono creare effetti luminosi particolari. Le fibre ottiche sono costituite da tubi sottili di materiale trasparente (vetro o polimetilmetacrilato) rivestiti da altri tubi, sempre di materiale trasparente. La sorgente di luce, posta a una estremità del fascio di fibre e opportunamente concentrata su di esso, viene multi-riflessa lungo le fibre e convogliata verso l'altra estremità del fascio. In questo modo, non solo è possibile creare con libertà effetti luminosi ma anche, in pratica, allontanare notevolmente la sorgente dal punto d'illuminazione ossia dalla vicinanza degli oggetti da illuminare. È una via indiretta per realizzare illuminazioni a bassa emissione termica, molto interessante per le ragioni dette per i BB.CC.

Nell'illuminotecnica, i *sistemi di illuminazione* rappresentano il momento di organizzazione, coordinamento e gestione di tutto l'apparato tecnologico. Il sistema d'illuminazione coniuga tra loro in maniera funzionale e armonica una quantità di elementi diversi: tutte le sorgenti di illuminazione e cioè quelle artificiali da inserire *ex novo* con quelle naturali o anche artificiali eventualmente già presenti e inamovibili, la reciproca collocazione delle sorgenti, la collocazione delle sorgenti rispetto al soggetto o ai soggetti, la tipologia dei soggetti da illuminare (policromie bidimensionali, oggetti tridimensionali, oggetti di piccole dimensioni, oggetti eterogenei, grandi complessi architettonici o archeologici, vaste superfici, ecc.), i valori storico-espressivi-estetici di

essi, la sensibilità agli effetti luminosi e agli effetti termici dei loro materiali costitutivi, l'ambiente a contorno del soggetto in cui l'illuminazione si realizza (sfondi, soggetti secondari, ecc.), i tempi di illuminazione, gli automatismi dell'impianto, le centraline di gestione, i costi d'impianto di esercizio e di manutenzione dell'efficienza, ecc.. Ovviamente non in tutti i casi i numerosi e diversi elementi sopra citati sono co-presenti, ma certamente lo sono in parte consistente, nella maggioranza delle situazioni. Per la realizzazione di un sistema di illuminazione è indispensabile quindi una *fase progettuale* accurata e complessa. La realizzazione di un sistema di illuminazione richiede competenze multi-disciplinari effettive e oggettive. Il gusto è un parametro importante ma non lo è l'arbitrarietà. In pratica, il sistema di illuminazione è un mezzo potente di valorizzazione dei BB.CC., ma altrettanto, se usato impropriamente può esserlo di 'devalorizzazione'.

Orientamenti per l'innovazione tecnologica

Nell'illuminotecnica non dobbiamo pensare che l'innovazione sia incentrata solamente o prioritariamente nel migliorare la qualità dei mezzi tecnologici che servono a realizzare i sistemi d'illuminazione, quanto nell'*affinamento delle competenze* per sviluppare una preparazione specialistica alla progettazione in quest'ambito. Ciò non deve essere inteso a livello di singole figure di esperti illuminotecnici per i BB.CC., ma di specializzazione a dimensione aziendale. L'illuminotecnica già spazia in settori molteplici per loro natura assai trainanti e non è certo il solo ambito dei BB.CC., benché affatto trascurabile, a stimolare l'innovazione dei mezzi tecnologici (dalle sorgenti a tutto ciò che al loro funzionamento e assetto è ausiliario: supporti per le lampade, impianti di automatismo, sistemi di direzionamento, movimentazione, centraline, ecc.). Il 'mercato' delle applicazioni ai BB.CC. è sicuramente in forte espansione proprio in quanto l'illuminotecnica punta in maniera moderna e impegnata proprio alla valorizzazione, che sappiamo essere aspetto strettamente correlato al turismo. È indubbio perciò che quanto emerge di innovativo in altri settori applicativi dell'illuminotecnica possa essere vantaggiosamente trasferito anche ai BB.CC.. L'innovazione in questo ambito e gli spazi di affermazione delle aziende sono dunque da ricercare proprio nella conquista (non facile) di una competenza aziendale reale e specifica, che coniughi le conoscenze tecnologiche del settore con le esigenze complesse, delicate e ricche di veti, proprie dei BB.CC.. È in questa direzione che si aprono prospettive sicuramente concrete e importanti.

15. SENSORISTICA DI ALLARME E SISTEMI CORRELATI DI INTERVENTO PER LA SICUREZZA E LA SALVAGUARDIA DEI BENI CULTURALI

Ruolo della sensoristica nei Beni Culturali

Lo sviluppo straordinario dell'elettronica che si è registrato negli ultimi decenni, ha consentito, tra le altre cose, di miniaturizzare progressivamente la componentistica impiegata nella strumentazione più varia. Un settore che certamente ha beneficiato in maniera sostanziale di questo processo è quello dei *sensori*. Un sensore è costituito da un elemento sensibile a un qualche tipo di grandezza fisica e alle sue variazioni, che è in grado di trasformare in segnali elettrici di intensità proporzionale alla loro entità. I segnali, successivamente, possono essere amplificati, registrati, digitalizzati, processati matematicamente o graficamente, per mettere in evidenza l'andamento delle variazioni, fare valutazioni, comparazioni, esami statistici e quant'altro. Il componente fondamentale del sensore è l'elemento sensibile alla grandezza da rilevare e misurare, che deve avere carattere di specificità, elevata sensibilità e possibilità di conversione in segnale elettrico. Negli ultimi decenni, per una quantità di grandezze o fenomeni correlati, quali ad esempio dilatazioni, vibrazioni, variazioni della temperatura, dell'umidità relativa, del pH, dell'intensità della luce, del colore ecc., sono stati studiati e messi a punto sensori specifici, i quali hanno contribuito a migliorare in maniera sostanziale la

rilevazione e la quantificazione della fenomenologia fisica nei più vari ambiti. Sebbene a priori non sia indispensabile, è tuttavia auspicabile, e in molti casi determinante, che i sensori abbiano dimensioni ridotte. Ciò risponde, primariamente ad alcune importanti esigenze. Più piccolo è il sensore, più elevate sono le sue capacità di rilevare un fenomeno *puntualmente* in un determinato contesto. Sensori di piccole dimensioni, all'occorrenza, possono essere distribuiti su superfici o su volumi di oggetti o di strutture, in modo da misurare una determinata grandezza non solo nelle sue variazioni temporali ma anche in quelle spaziali. Da ciò è facile comprendere perché il processo di miniaturizzazione della componentistica elettronica abbia giocato un ruolo essenziale per i sensori. La quantificazione spazio-temporale di una grandezza e delle sue variazioni ha infatti un interesse enorme in una quantità di aree applicative. I BB.CC. non potevano essere da meno. Anche se questo settore si presenta alquanto riflessivo all'invasività delle tecnologie in genere, esistono esigenze che riguardano i BB.CC. che possono beneficiare in maniera determinante dell'impiego dei sensori per cui anche in quest'ambito essi stanno divenendo una realtà. Essendo quella dei sensori una tecnologia d'avanguardia, essa ha trovato più immediate possibilità di applicazione in quelle categorie di attività dei BB.CC. che si sono sviluppate in tempi più recenti e, infatti, i problemi di sicurezza e salvaguardia sono stati tra i primi a essere affrontati anche con l'utilizzo di sensori. Prima di prendere in esame la sensoristica già a disposizione o da implementare per queste importanti esigenze riguardanti il patrimonio culturale vale la pena di richiamare brevemente quanto è stato anticipato nella parte introduttiva di questo testo a proposito di salvaguardia e sicurezza. In ordine a motivi di chiarezza sono stati riferiti alla *Salvaguardia* quelle tipologie di rischio di danno ai BB.CC. che hanno origine da eventi naturali o paranaturali (ossia non causati volontariamente dall'uomo). Tra questi possono essere citati *terremoti, alluvioni, frane, smottamenti e incendi non dolosi*, nonché gli *effetti del clima* dovuti a *temperatura, umidità, condensa, pioggia battente, vento, insolazione, luce, radiazione U.V.*, ecc.. A questi si devono ancora aggiungere gli effetti dell'*inquinamento atmosferico (gas acidi e particolato)*. Sebbene l'inquinamento non possa certamente essere considerato un tipo di evento naturale, esso è tuttavia determinato da cause indirette (e quindi non volontarie) delle attività umane. Si è invece circoscritto all'ambito della *Sicurezza* quei rischi di danno provocato da atti volontari dell'uomo e che assumono quindi il profilo di azioni criminali. Tra questi, gli *atti vandalici* e i *furti* ma anche gli *incendi dolosi* e i danni conseguenti a *operazioni di guerra*, spesso, purtroppo, espressamente volontari. Il ruolo dei sensori nei confronti dei citati rischi è soprattutto quello di segnalare una situazione di *allarme* allorché, per un determinato parametro, vengano superate certe soglie di valori che individuano situazioni di normalità e di sicurezza. L'allarme innescato dai sensori, tuttavia, non avrebbe efficacia se non strettamente correlabile a un intervento appropriato di protezione, atto cioè a prevenire, scongiurare o mitigare il danno in tempo utile. Questo stretta correlazione 'allarme/rimedio da mettere in atto' è essenziale nella sensoristica in genere ma tanto più cruciale nell'ambito dei BB.CC., dove il rischio di un danno segnalato ma non seguito da un provvedimento di protezione/prevenzione può portare a conseguenze anche irreparabili per il bene stesso. Nell'illustrare, dunque, la funzione dei sensori nelle diverse tipologie di rischi potenzialmente incombenti sui BB.CC. si è cercato di tener conto, oltre che della disponibilità di un sensore specifico, anche della possibilità di adottare un conseguente provvedimento.

Stato dell'arte e carenze

Il rischio sismico

Non sempre i sensori sono in grado di segnalare uno stato di allarme in tempo utile ad adottare provvedimenti di salvaguardia efficaci. Il caso dei *terremoti* è emblematico in tal senso.

I terremoti sono noti eventi altamente catastrofici per persone, per strutture e per cose presenti nell'area colpita. I *sismografi* di fatto sono dei sensori che si fondano sul principio del pendolo e che registrano, sfruttandone l'inerzia, le onde provocate dal sisma di cui misurano l'intensità, il tipo e altri parametri che caratterizzano il sisma. Tuttavia il sismografo si attiva solo quando il sisma è già in azione e non può rispondere, quindi, all'esigenza di una valida azione preventiva né protettiva. Per di più, quand'anche un sensore fosse in grado di segnalare l'evento con un certo anticipo, se ne avrebbe un indubbio straordinario beneficio per le persone che abitano il territorio colpito, ma minimale per le cose in genere poste in quel sito, fra cui i BB.CC. e, massimamente, per il patrimonio architettonico. È questa, infatti, la tipologia di beni che viene particolarmente colpita dagli effetti del sisma. Non esistono, in pratica, provvedimenti validi a neutralizzare la devastazione che un sisma provoca sul costruito in genere e soprattutto sull'edilizia antica, realizzata in tempi in cui si era ben lontani da adottare criteri costruttivi antisismici. Diverso, nei confronti di un sisma, potrebbe essere il caso di alcune speciali tipologie di beni, quali ad esempio opere di statuarie in marmo o in pietra, di eccezionale rilevanza. Per questi casi speciali, in teoria, si potrebbe pensare all'utilizzo di *sistemi avvolgenti* espressamente progettati ispirandosi all'azione di salvaguardia assicurata dagli *air-bag* negli incidenti di auto. In tal caso, tuttavia, il sensore del sisma, una sorta di appropriato sismografo, dovrebbe essere collocato in prossimità dell'oggetto, in modo, non solo, da innescare l'allarme ma anche da far scattare immediatamente il meccanismo di protezione, specifico per quell'oggetto. I costi, non tanto dei sensori, quanto del *sistema di protezione 'avvolgente'*, risulterebbero prevedibilmente elevati, ma il valore di alcuni capolavori statuari, patrimonio dell'umanità, come il David di Michelangelo o l'«Apollo e Dafne» del Bernini, potrebbero giustificare l'impegno economico. In definitiva quindi, il sismografo è un tipo di sensore che di fatto può risultare utile solo per alcune situazioni molto particolari e solo se collocato in vicinanza dell'oggetto e connesso a un meccanismo fulmineo di adeguata protezione, ovviamente da implementare. Il problema del rischio sismico per i BB.CC., viene comunemente affrontato a livello gestionale, programmatico e, in minor misura, preventivo attraverso le *carte del rischio*. In Italia l'Istituto Centrale per il Restauro, dietro incarico ufficiale del Ministero, ha elaborato un censimento su mappe computerizzate della distribuzione territoriale dei beni in funzione dei vari tipi di rischio. Il data-base consente di conoscere per un consistente numero di monumenti e siti archeologici il grado di rischio, anche e particolarmente quello di tipo sismico, cui essi sono esposti. La carta è uno strumento di estrema utilità per meglio indirizzare i finanziamenti per la conservazione dei BB.CC. sia a livello preventivo, nel mettere in maggior sicurezza (soprattutto attraverso opere di consolidamento) monumenti siti in aree ad alto rischio, sia in caso di evento catastrofico, per rendere più spediti gli interventi di soccorso e messa in sicurezza di quanti si trovi in condizioni precarie di stabilità, grazie alla conoscenza puntuale dei beni distribuiti nel territorio colpito.

Il rischio idrogeologico

Anche per i rischi di *natura idrogeologica* (alluvioni, frane, smottamenti, esondazioni di dighe, ecc.) si è di fronte, nuovamente, a situazioni in cui la sensoristica non può essere, in generale, di grande aiuto. Anche i citati eventi catastrofici, infatti, hanno in comune con i terremoti il fatto di essere talmente repentini da rendere pressoché impraticabile la realizzazione di sistemi di salvaguardia basati su sensori di allarme collegabili a meccanismi protettivi efficaci. Inoltre, si tratta di eventi che, come i terremoti, interessano quantità di beni distribuiti su interi territori, piuttosto che singoli oggetti. Anche in questo caso, il patrimonio architettonico è quello più esposto al danno, purtroppo quasi sempre devastante e senza pratiche possibilità di salvaguardia. Per oggetti di minori dimensioni si potrebbe pensare nuovamente a *sistemi avvolgenti* capaci di

proteggere gli oggetti non solo dagli urti e dalle pressioni ma anche, in questo caso, dal contatto con l'acqua, che creino perciò *involucri impermeabili*. Tali sistemi, laddove se ne riconoscesse l'utilità e la possibilità di realizzazione, dovrebbero essere messi istantaneamente in azione da *sensori di posizione* (optoelettronici, acustici, ecc.), che segnalano, cioè, rapidi spostamenti degli oggetti protetti, di entità superiore a una certa soglia. Anche nel caso delle alluvioni, che hanno tempi di evoluzione meno fulminei degli altri eventi catastrofici citati, risulta comunque assai difficile intervenire in tempo utile per portare in salvo il patrimonio mobile. Di sensori vicini agli oggetti, in questo caso non vi sarebbe necessità poiché generalmente un evento alluvionale, quando si verifica, è immediatamente segnalato.

Il problema sta nell'enormità del patrimonio da mettere in salvo e nella sua dispersione nel territorio colpito dall'evento. D'altra parte è praticamente impossibile dotare ogni singolo oggetto mobile di un sistema di salvaguardia, fatta esclusione, ancora una volta, di oggetti di eccezionale rilevanza. Tanto peggiore, anche in questo caso, è la situazione per il patrimonio architettonico.

Il rischio da incendi

Considerando ora gli *incendi*, dolosi o non, la situazione cambia in senso positivo in quanto i sensori, per questo tipo di evento, possono non solo segnalare la situazione di allarme ma farlo in tempo utile a far scattare provvedimenti efficaci di salvaguardia. I sensori oggi disponibili sono di vari tipi e basati su principi diversi. I *rivelatori di fumo* misurano la presenza di fumi in un ambiente quando essi superano una certa soglia. Sono sensori ottici basati su sistemi trasmettitore/ricevitore, che operano nell'infrarosso. Sfruttano sia l'attenuazione dell'intensità del raggio IR tra trasmettitore e ricevitore causato dal fumo chiaro o scuro, sia la diffusione della radiazione IR per effetto Tyndall. Ne esistono di lineari e di puntuali. I primi, con un unico trasmettitore e più ricevitori, sono più adatti a controllare un intero ambiente. Si parla allora più propriamente di *impianto* antincendio. Tuttavia, non tutti gli incendi producono fumi (né, d'altra parte tutti i materiali che bruciano producono inizialmente una fiamma). Basandosi allora su fenomeni termici si hanno i *rivelatori termovelocimetrici*, i quali tengono conto sia del valore della temperatura (come i termostati) che della sua velocità di crescita. Quando entrambe superano determinati valori, fanno scattare l'allarme.

I *rilevatori di fiamma* sono ulteriori sensori, nuovamente basati su fenomeni ottici nell'infrarosso. La fiamma emette anche radiazioni infrarosse che pulsano a una certa frequenza e che si distinguono sia da quelle del sole che da quelle delle lampade. Il rivelatore non è sensibile alla luce e quindi è in grado di segnalare la presenza di una fiamma anche quando questa fosse offuscata dai fumi. Naturalmente sono strutturati per coprire un elevato angolo visuale. Meno adeguati alle esigenze di musei e chiese appaiono i *rilevatori di gas* (metano, monossido di carbonio, acido solfidrico, ecc.), i quali si liberano soprattutto in ambienti domestici o in fabbriche e che possono, come è noto, scatenare incendi ed esplosioni. Per la realizzazione di un impianto antincendio in un ambiente museale o in un palazzo antico o in luogo di culto, occorre un progetto. Questo richiede che le aziende specializzate, non siano solo in grado di fornire i sensori adatti, che all'occorrenza possono essere anche di tipi diversi per far fronte a una molteplicità di tipologie di incendi, ma anche di valutarne attentamente la collocazione, la distribuzione, la conformazione estetica e quant'altro, in funzione dello specifico contesto cui l'impianto è destinato: in altre parole, competenze specifiche, rispondenti alle esigenze proprie dei BB.CC.. Segnalato l'allarme occorre che gli interventi di salvaguardia entrino tempestivamente in azione.

Un incendio, di solito, non è repentino come un terremoto ma richiede comunque tempi rapidi. Il problema degli incendi viene affrontato innanzitutto a livello preventivo con l'utilizzo di *trattamenti autoestinguenti* per i materiali destinati ad arredi, vetrine, strutture, ecc.. Ciò

ritarda il propagarsi dell'incendio ma non evita che le opere, molte delle quali sono realizzate con materiali altamente combustibili (dipinti, tessuti, testi antichi, disegni su carta e pergamena, ecc.) scampino al danno quando vengono interessate direttamente dalle fiamme. I sistemi di estinzione sono per lo più basati su *gas estinguenti* (essenzialmente CO₂) e su *acqua* (sistemi a 'sprinkler' e a schiuma). Sebbene sistemi a 'sprinkler' utilizzino microgoccioline d'acqua, e le schiume, pur a base acquosa, siano fondamentalmente costituite da aria, rimane il fatto che molte delle citate tipologie di BB.CC. sono vulnerabili all'azione dell'acqua che li danneggerebbe irrimediabilmente, per cui questi sistemi appaiono poco adeguati alle esigenze della prevalenza dei musei. Rimane dunque percorribile soprattutto la via dei gas estinguenti, realizzata a mezzo di estintori, che nella prevalenza dei casi vengono tuttavia azionati a mano. Per un'efficace azione antincendio nei confronti dei BB.CC. occorrerebbero invece sistemi auto-estinguenti a gas, che entrano in azione quando il sensore segnala un oggettivo stato di allarme. Ciò è possibile nelle ore di chiusura del museo, ma va incontro a una quantità di problemi legati alla presenza di personale di custodia e visitatori, durante le ore di accesso. L'automatismo dei sistemi antincendio, per migliorare la tempestività d'intervento - cosa essenziale in caso d'incendio, prima che entrino in opera i mezzi a controllo umano - dovrebbe essere oggetto di maggiore attenzione da parte delle aziende specializzate e degli esperti del settore e di studi specifici per risolvere i complessi problemi di compatibilità che si pongono.

Il rischio da furti e vandalismi

Il problema dei *furti* è altamente sentito nei BB.CC., particolarmente per le opere conservate in chiese e luoghi di culto in genere e, in misura minore, in musei e luoghi pubblici. In parallelo con la crescita delle moderne tecnologie i *sistemi anti-intrusione o antifurto* hanno avuto uno sviluppo sorprendente, sia perché il problema dei furti interessa oramai una vasta quantità di categorie di utenti - banche, abitazioni private, esercizi commerciali, aziende, ecc. - sia perché, con l'espandersi della micro-criminalità, il fenomeno stesso è in progressivo aumento. Il mercato di riferimento, di conseguenza, è oggi vasto e agguerrito, in grado di offrire ottime soluzioni tecnologiche, molte delle quali valide anche per l'ambito dei BB.CC.. I sensori o *rivelatori* (a *infrarossi*, a *microonde* e a *tecnologia mista*) sono solo una parte di un *sistema antifurto*, il quale, a seconda del grado di sofisticatezza, può includere centraline per la gestione e il controllo di più rivelatori, sirene di allarme locali, trasmettitori di allarme per contatto, altri rivelatori di tipo microfonico per segnalare rottura di vetri ecc., allarmi via telefono, via radio, via GSM, ecc. I rivelatori anti-intrusione possono essere di tipo volumetrico o perimetrale. Nel primo caso (*rivelatori a infrarossi passivi*) segnalano l'intrusione di estranei in un ambiente (come in una sala museale). L'intruso, emettendo energia infrarossa (calore) nel raggio di azione coperto dal sensore, lo attiva facendo scattare l'allarme. I sensori perimetrali (*a infrarossi attivi*, a *microonde*, ecc.) si basano invece sull'interruzione del fascio di radiazione tra una emittente e una ricevente, causata dal passaggio dell'intruso; servono quindi soprattutto a proteggere gli accessi agli edifici. Sistemi a maggior garanzia si basano, ovviamente, sulla combinazione di rivelatori di tipologie diverse, in quanto ciascuna tipologia è caratterizzata da vantaggi e limiti e inconvenienti (falsi allarmi, ecc.), che vengono compensati dall'utilizzo combinato. È anche comprensibile che, in funzione della dimensione degli ambienti da sorvegliare, i sensori, al di là delle diverse tipologie, siano molteplici nel numero.

I *sistemi di trasmissione* di allarme possono essere *diretti* (sirene di allarme) a effetto soprattutto dissuasivo, o *a distanza*, come già si è detto, via telefono, via radio, via GSM. I diversi sistemi di trasmissione a distanza hanno ragione d'essere per scongiurare il pericolo di disattivazione della segnalazione di allarme da parte del ladro, per cui principi sempre più sofisticati, che proteggono da

manipolazioni, sono stati sviluppati per evitare di invalidare il processo. Gli impianti anti-intrusione vengono solitamente attivati a chiusura degli ambienti di fruizione (chiese, musei, ecc.).

Ciò non toglie che gli stessi sistemi di protezione, oltre al problema del furto, vengano anche incontro a quello degli atti *vandalici* nei confronti di singoli oggetti, soprattutto di particolare pregio. In tal caso, il sistema di protezione viene posizionato a protezione del solo oggetto e realizzato soprattutto con rivelatori perimetrali. È ovvio che un complesso di elementi elettronici con differenti funzioni, come sopra descritto (rivelatori, sistemi di trasmissione del segnale, ecc.) debba essere gestito da centraline idonee, in grado non solo di controllare automaticamente l'intero sistema ma anche di individuare e neutralizzare falsi allarmi e segnalare per tempo guasti e mal funzionamenti dell'impianto.

Occorre, dunque, anche per questi tipi di sistemi di protezione, un progetto specifico, adeguato al contesto cui è destinato, progetto che le aziende specializzate nel settore (che sono oramai molteplici) devono saper calibrare alle esigenze proprie dei BB.CC..

Il rischio microclimatico

La protezione da *alterazioni delle condizioni climatiche* è un problema ormai da tempo affrontato nell'ambito della climatizzazione museale, sebbene in misura assai minore per le strutture architettoniche, soprattutto laddove siano presenti decorazioni murali di pregio quali affreschi, graffiti e opere policrome in genere, ma anche modellati in bassorilievo, stucchi, ecc., e cioè soprattutto in chiese e palazzi antichi. Sappiamo, da quanto illustrato nella scheda dedicata ai sistemi di climatizzazione museale, come ogni tipo di manufatto richieda di essere conservato in condizioni climatiche che oscillino – di preferenza il meno possibile - in un determinato dominio. Il clima di un ambiente interno si identifica infatti in una serie di combinazioni di valori di temperatura e di umidità relativa. In un diagramma temperatura/U.R. il clima adatto per una certa tipologia di oggetti, corrisponde grossomodo a un 'rettangolo', i cui lati coincidono con i valori minimi e massimi di temperatura e, rispettivamente, di U.R., oltre i quali i materiali costitutivi dell'oggetto verrebbero a soffrire. Ma per i BB.CC. la questione del mantenimento di condizioni ambientali climatiche opportune non è rilevante soltanto agli effetti dei materiali costitutivi, in relazione alle loro possibili dilatazioni/contrazioni, ma riguarda anche altri fenomeni di possibile degrado. Nelle strutture *architettoniche* e negli ambienti che ospitano decorazioni murarie, ad esempio, sono prevalenti due cause di degrado fortemente legate alle condizioni climatiche interne, sebbene in maniera opposta. I materiali porosi antichi (murature, intonaci, stucchi), quasi sempre interessati da presenza di sali solubili infiltrati nel corso dei secoli per molteplici ragioni, non tollerano i climi *freddo-asciutti*. La maggioranza dei sali infatti presenta minimi di solubilità a temperature basse e, ovviamente, tende a passare dallo stato di soluzione allo stato solido cristallino con l'evaporazione dell'umidità, ossia quando l'aria è asciutta.

Per contro, l'aggressione da agenti microbiologici è normalmente favorita dai climi *caldo-umidi*. Per riassumere, sia in ambito museale sia soprattutto in ambito architettonico, si pone la necessità di combinazioni di sensori di temperatura e di U.R. capaci di segnalare una situazione di allarme, in un caso, per la deriva del clima al di fuori del 'rettangolo T/U.R.' ideale per la conservazione, nell'altro, di deriva verso 'aree climatiche' a forte rischio di degrado per le strutture stesse. Il compito dei *sensori* (*termometri* e *igrometri* progettati in modo da segnalare soglie minime e massime) è quello di segnalare l'uscita da un'area climatica' di sicurezza oppure l'ingresso in un'area climatica' a forte rischio.

Mentre nei musei il problema dell'allarme si pone in maniera meno pressante, poiché i sistemi di climatizzazione progettati mantengono, salvo guasti, le condizioni climatiche nei domini di sicurezza, in chiese e palazzi storici, non sempre condizionati, o peggio condizionati a favore delle

persone che li frequentano piuttosto che delle opere che vi sono ospitate (affreschi, stucchi, ecc.), il problema dell'allarme da rischio climatico si pone in maniera più seria e pressante ed è oltretutto generalmente sottostimato. La sensoristica di allarme per il rischio climatico in questi ambienti dovrebbe essere molto più diffusamente utilizzata e soprattutto implementata per rispondere alle descritte esigenze.

Il rischio da inquinamento ambientale

Sempre in relazione alle condizioni ambientali vi è poi da considerare il problema dell'*inquinamento*. *Gas acidi* e *polveri*, sappiamo, minacciano costantemente una quantità di tipologie diverse di manufatti antichi. Il problema si pone sia per le opere all'interno che, soprattutto, per quelle all'esterno. L'attacco acido dei materiali carbonatici (marmi, pietre calcaree, intonaci decorati, ecc.), ad esempio, richiederebbe sensori specifici per segnalare condizioni di massimo rischio per la loro salvaguardia. Questi agenti attaccano con cinetiche nettamente più veloci in presenza di acqua liquida. Il mix 'inquinanti acidi/condensa' individua una situazione ad altissimo rischio.

Questa situazione si determina generalmente nei periodi autunnali e anche invernali (ad esempio dopo un lungo periodo di assenza di pioggia). Molti monumenti in tali condizioni corrono rischi gravi soprattutto se gli eventi citati sono ripetitivi. Nessuno, purtroppo, si preoccupa dei monumenti esposti all'aperto, che subiscono passivamente l'attacco degli inquinanti, se non quando il danno è ormai palese e se ne decide il restauro, mentre le autorità locali, solitamente, dove più dove meno, intervengono, imponendo limitazioni al traffico urbano, una delle fonti primarie delle emissioni, quando si superano i valori di allarme. Le soprintendenze potrebbero imporre l'inserimento di idonei sensori distribuiti in vie e piazze dove si trovano monumenti a rischio, proprio per segnalare condizioni di 'inquinamento elevato da gas acidi in concomitanza con condizioni climatiche di condensa atmosferica' (quindi di elevata umidità). I sensori, di conseguenza, dovrebbero essere duplici, *sensibili ai gas più ricorrenti* (SO_2 e NO_2) e *sensibili ai tenori di U.R.*, tali da segnalare un allarme, ad esempio, *luminoso*, quando si superano determinate soglie, così da stimolare le autorità locali a prendere provvedimenti limitativi del traffico, anche per la salvaguardia dei monumenti.

Prospettive di innovazione nella sensoristica dedicata ai BB.CC.

L'argomento dei sensori è potenzialmente inesauribile. Ogni grandezza fisica che ha a che fare col rischio di compromissione dello stato di un'opera o di un complesso monumentale, o con la sua integrità, o con il suo stesso permanere in un ambiente, è potenzialmente segnalabile da uno specifico sensore o serie di sensori o complesso di sensori diversi. I sensori sono sensibili a fenomeni e a eventi che talvolta sono sotto i nostri stessi occhi, ma che essi registrano in maniera estremamente più potente o con tempistiche di gran lunga superiori o in momenti in cui non possiamo assicurare una sorveglianza diretta, oppure segnalano fenomeni significativi per i BB.CC., che sfuggono ai nostri occhi e ai nostri sensi, allarmandoci per tempo. La loro utilità per il patrimonio culturale è reale e indiscussa e il loro progressivo sviluppo è assolutamente prevedibile. Nelle strategie stesse della conservazione essi vengono potenzialmente a coprire un'attività di sorveglianza del patrimonio da parte di personale di custodia o da parte di esperti, che oggi non è ancora realtà, sia per i costi che comporterebbe, sia perché l'idea stessa non è ancora sufficientemente matura, ma che potrebbe divenire tale, a tutto vantaggio del patrimonio, proprio grazie a specifici sensori. Gli esempi illustrati non hanno solo lo scopo di far comprendere ciò che già è utilizzato e chiede solo di essere perfezionato, ma anche quello di fornire spunti per stimolare l'individuazione di nuovi sistemi di sorveglianza fondati su sensori, che un pool di esperti di BB.CC., ricercatori di enti scientifici e aziende del campo, possono far propri per nuovi progetti di sviluppo innovativo di interesse industriale.

16. L'IMPIEGO DI TECNOLOGIE INFORMATICHE E DI COMUNICAZIONE (ICT) NEI BENI CULTURALI

L'ingresso dell'ICT nei BB.CC.: utilità e strategie

L'ICT, acronimo che comprende una quantità oltremodo vasta di possibili e potenti tecnologie derivate dalle discipline informatiche e delle telecomunicazioni, sta rivoluzionando da alcuni decenni il nostro stesso vivere e agire quotidiano, sia nelle nostre attività professionali, che amatoriali o semplicemente quotidiane. I BB.CC., per propria natura, costituiscono un terreno ideale di applicazione delle moderne tecnologie informatiche e di comunicazione. Tuttavia, come per tutte le innovazioni, affinché esse divengano effettivi mezzi di ampliamento e miglioramento delle conoscenze e delle possibilità di azione, occorre che ne venga fatto un uso intelligente e misurato. L'abuso o il 'sott-uso', se così si può dire, generano risultati controproducenti o riduttivi. È cruciale sottolineare questo aspetto nel momento in cui si introduce l'argomento dell'ICT in riferimento ai BB.CC., un mondo, per propria natura, esclusivo. Come si è più volte osservato in questo scritto, i BB.CC. sono alieni all'invasività della tecnologia, che è spesso considerata generatrice di un abbassamento del livello culturale. Così è stato, in effetti, per alcune comuni tecnologie entrate in uso nella nostra vita quotidiana. Emblematico è il caso della televisione e del giudizio perennemente controverso che si è usi darne: da una parte, strumento di straordinaria potenza per la diffusione dell'informazione, dall'altra, altrettanto potente, di banalizzazione delle conoscenze. Di fatto, nei BB.CC., l'ICT può veramente divenire il motore di innovazioni di grande portata sotto molteplici aspetti, ma occorre che il processo si realizzi in maniera graduale per evitare che ne vengano compromesse in partenza le enormi oggettive possibilità. Vi sono anche altri ostacoli all'ingresso dell'ICT nei BB.CC.. Uno tra questi, ad esempio, è la pervadente burocrazia che caratterizza tanti ambiti delle strutture pubbliche dei BB.CC., burocrazia che tenacemente è di ostacolo a ogni tentativo di snellimento delle attività di gestione. Ma non è neppure da sottovalutare un altro fatto: gli esperti di informatica, e in generale dell'ICT, danno solitamente per scontato la familiarità della gente, e quindi anche degli attori dei BB.CC., con una terminologia gergale diffusa nel settore e con la conoscenza stessa degli strumenti tipici dell'informatica (i vari applicativi, i CD e DVD, il web, i palmari, le immagini digitali, e ancora, la maniera di accedere, via Internet, alle diverse risorse), familiarità che invece, nei riscontri pratici, spesso non è tale. L'ICT non deve essere fonte di nuove complicazioni ma, al contrario, agire come uno strumento per quanto possibile invisibile, indirizzato a *potenziare* le azioni tradizionali, *semplificandole*, cosa che di fatto è realmente possibile. Gli esperti informatici devono dunque, al fine di rendere fruibile e accessibile un bene, collaborare con coloro che si occupano di BB.CC. (archeologi, storici dell'arte ecc.) per creare un sistema di gestione e divulgazione del bene utile e utilizzabile..

Campi di applicazione dell'ICT nei BB.CC.: benefici e limiti

Le ICT nella gestione dei BB.CC.

Le aree di applicazione dell'ICT nei BB.CC. sono veramente numerose. L'informatica offre primariamente *strumenti di gestione* di indiscusso vantaggio. Non esiste ormai azienda o esercizio commerciale, nei quali gli applicativi dell'informatica non costituiscano lo strumento principe di gestione. L'intero dominio delle appartenenze e delle operazioni a esse connesse (produzione, stoccaggio, transazione, ecc.) è ormai gestito pressoché interamente con l'impiego di programmi informatici. In pochi decenni è scomparsa la maggioranza dei documenti cartacei, che accompagnavano le diverse attività e ne appesantivano in tutti i sensi, la realizzazione. I *database* sono per questo lo strumento fondamentale. Anche nell'ambito dei BB.CC., i proprietari, sia pubblici,

come Soprintendenze ed Enti locali, che privati, come diocesi, banche, ecc., di beni del Patrimonio Culturale, hanno cominciato ad avvalersi delle straordinarie possibilità offerte da questi efficaci mezzi gestionali. I *database* rispondono, primariamente, all'esigenza dell'essere a conoscenza, in ogni momento, *di cosa si dispone* (identità di un oggetto appartenente a un certo contesto, come una collezione, un sito archeologico, ecc.) e *dove sta* (collocazione dell'oggetto nel contesto). Al contempo, essi possono offrire una quantità di altre informazioni, ricche di più specifici dettagli, come la descrizione testuale dell'oggetto, sue eventuali documentazioni fotografiche (digitali o digitalizzate), informazioni sulla sua provenienza, la sua tecnica costruttiva, i dati di eventuali analisi archeometriche, la sua storia conservativa, il suo stato attuale di conservazione, i risultati di analisi diagnostiche, il grado di rischio che esso corre in riferimento a eventi naturali, come alluvioni e terremoti, o ad azioni criminali, come furti, atti vandalici, incendi, ecc.. Tutto ciò, in maniera facilmente accessibile e in tempi rapidissimi (pensiamo, per confronto, alla consultazione di un analogo archivio cartaceo, come si era usi fare solo pochi decenni orsono!).

In un *database* possono coesistere differenti livelli di dettaglio dell'informazione, che corrispondono a differenti finalità di utilizzo. *Identità* e *Collocazione* di ogni singolo oggetto in un contesto di BB.CC. individuano un *livello primario*, che risponde a un'esigenza di immediatezza, utile soprattutto all'archivista, che deve appunto conoscere velocemente e facilmente 'i beni che esistono' e 'dove si trovano'.

Questa è una prima esigenza, che i criteri di strutturazione di un *database* per i BB.CC. devono poter soddisfare: accesso a notizie schematiche, riferibili in maniera chiara, presentate in un *format* semplice e condivisibile tra possessori di beni diversi per facilitare eventuali confronti. A corredo dei dati di identità è tuttavia auspicabile disporre di un identificativo (numero di inventario) e di una descrizione morfo-tipologica e iconografica dell'oggetto (essa stessa schematica e compilabile secondo criteri definiti) e, naturalmente, una o più sue immagini. Ciò rende univoca, all'occorrenza, la possibilità d'identificazione dell'oggetto.

A un diverso livello appartengono invece le altre, più specifiche tipologie di informazione sopra citate. Queste, infatti, rispondono non solo alle esigenze dell'archivista, ma soprattutto di specialisti diversi, quali studiosi del settore (provenienza, tecnica costruttiva, indagini archeometriche, ecc.), curatori, conservatori e restauratori (storia conservativa, attuale stato di conservazione, indagini diagnostiche, ecc.), nuovamente curatori e conservatori ma in risposta a esigenze di salvaguardia del patrimonio, nei confronti di rischi naturali e para-naturali (terremoti, alluvioni, esposizione in ambienti inquinati, ecc.), o di sicurezza nei confronti di azioni criminali (atti vandalici, furti, incendi, ecc.). Quest'ultimo tipo di informazione è ovviamente d'interesse anche delle autorità giudiziarie, di polizia, ecc.. Differenti livelli di consultazione significa gradi appropriati di accesso all'informazione che in un caso corrispondono a esigenze di velocità mentre nel secondo, di approfondimento. Per questo secondo livello, infatti, si deve pensare alla possibilità di accogliere documenti testuali discorsivi, report, anche arricchiti di documentazioni generali o dettagliate, ecc. Lo strumento fondamentale, per questo, è il motore di ricerca. Ad esempio, per uno studioso, può essere necessario effettuare confronti stilistici, cronologici, storici, ecc..

Per riassumere, i *database* per i BB.CC. devono essere progettati per rispondere a queste molteplici necessità adattandovisi in maniera dinamica. Chi consulta un archivio informatico sui BB.CC. può non avere confidenza con il lessico, i meccanismi e le modalità di approccio tipici dell'informatica. Il genere di consultabilità richiesto deve poter essere pseudo-elementare; proprio in questo risiedendo la sua potenza. Nella maggioranza dei casi non è così. I *database* disponibili nel settore sono spesso macchinosi, obsoleti, poco invitanti. La ragione va spesso ricercata nel fatto che gli esperti di programmazione hanno familiarità soprattutto con il tipo di esigenze che ricorrono in altri settori, e sono portati a trasferire quei modelli anche ai BB.CC.. Per contro, chi opera nei

BB.CC. conosce le proprie esigenze ma non sa spesso esternarle in termini appropriati a chi deve implementare gli applicativi. Ne scaturiscono spesso risultati ibridi di scarsa funzionalità.

Per creare un *database* facilmente fruibile e intuitivo, gli esperti dei due domini devono dunque collaborare sinergicamente al fine di trovare un linguaggio comune, che è alla base dello sviluppo di un applicativo utilizzabile. Di contenitori informatici inutilizzati o solo parzialmente sfruttati ve ne sono fin troppi.

Le ICT nella fruizione dei BB.CC.

Con lo strumento dei *database* l'ICT viene incontro in maniera sostanziale alle esigenze della catalogazione/archiviazione/gestione, e in misura minore, a quelle della conservazione, della sorveglianza e della sicurezza. Attraverso altri strumenti l'ICT si orienta invece verso le tematiche della *Fruizione* e, soprattutto della *Valorizzazione*. Questi sono ambiti particolarmente attrattivi, per i quali si è portati a prevedere importanti sviluppi delle tecniche della comunicazione e dell'informatizzazione. A livello museale, oggi, nel nostro paese, la fruizione è ancora per larga parte confinata all'utilizzo di strumenti di tipo tradizionale con i quali si informa il turista/fruttore circa l'identità degli oggetti in esposizione (titolo dell'opera, autore o scuola, anno o periodo di produzione, talora con qualche scarna additiva informazione sulla tecnica di esecuzione, per esempio olio su tela, fibbia in avorio, terracotta smaltata, ecc.). Nella maggioranza dei casi le informazioni vengono presentate in forma dimessa, con etichette o targhette spesso leggibili con difficoltà.

Va detto che ciò non sempre corrisponde a un segno di trascuratezza o di scarsa disponibilità all'ammodernamento, ma è invece il frutto di una scelta volontaria che si propone di ridurre al minimo ogni tipo di messaggio in grado di distrarre l'attenzione dall'oggetto primario d'interesse: l'opera in sé. È però una posizione che di fatto penalizza la fruizione, in quanto l'oggetto deve essere collocato nel suo contesto storico-sociale di appartenenza. Il comune visitatore, tuttavia, non ha in genere una preparazione o una sensibilità innata, che gli consentano di conoscere l'oggetto nei suoi molteplici significati, nella funzione e nel ruolo che esso ebbe in antico. Risulta così essere un visitatore 'passivo', e pur essendo ben disposto a conoscere, deve essere aiutato a crearsi un percorso personalizzato in base ai propri interessi grazie a una rete di conoscenza costituita da tutte quelle informazioni che sono collegate direttamente o indirettamente all'oggetto.

A sopperire alla carenza di informazioni in prossimità dell'opera, provvedono le brochure distribuite all'ingresso dei musei o le guide turistiche che accompagnano, a richiesta, i visitatori.

Ma esse, entrambe, presentano vantaggi e svantaggi. Le guide turistiche sono potenzialmente interattive ma risultano invasive nei confronti degli altri visitatori, mentre le brochure richiedono di essere lette, il che sottrae tempo all'osservazione e solitamente, a breve, diviene stancante.

L'ICT sembra poter offrire diversi strumenti, definiti *ali virtuali* (*virtual wings*): come *totem* o *palmari*. Il palmare, in particolare, è uno strumento agile e facilmente portatile, offre le informazioni tipiche ed essenziali di una guida e allo stesso tempo, per il visitatore esigente, consente qualsivoglia approfondimento. Ovviamente, essendo dotato di un display, il palmare può offrire una quantità di informazioni anche di carattere grafico e fotografico attraverso le quali se ne possono arricchire sia le potenzialità di guida sia quelle connesse all'informazione audio presentata. Nulla vieta che il palmare possa venir dotato anche di *software* a carattere didattico (utile evidentemente per le scolaresche) o ludico (con un'attenzione per i giovanissimi). La condizione cruciale è, tuttavia, che i contenuti di cui il palmare è dotato risultino correttamente accattivanti: correttamente, nel senso di essere sempre rispettosi del messaggio culturale; accattivanti, nel senso di saper coinvolgere, attraverso un modo sapiente di porgere gli argomenti, l'interesse e l'emozione del visitatore. A tal fine, al momento della progettazione dei *software*, occorre nuovamente avvalersi

della collaborazione di professionisti che possiedano l'insieme di queste conoscenze. L'ingresso dei palmari nei musei è attualmente in una fase embrionale ma, alla luce delle speciali qualità che lo caratterizzano, è assolutamente prevedibile che questo strumento, allo stesso tempo discreto e potente, abbia presto uno sviluppo consistente.

Un filone singolare e del tutto particolare di applicazione delle tecniche ICT è quello rivolto a una categoria singolare di utenti dei BB.CC., i *non-vedenti*. Questi hanno possibilità di accesso al web grazie a un tipo di *software* dedicato, lo *screenreader*, che è in grado di interpretare le informazioni in codice HTML e 'leggerle ad alta voce'. Ciò apre anche ai non vedenti la possibilità di interagire con quanto viene immesso in rete anche di attinente ai BB.CC., in particolare (si veda *ultra*) con il museo virtuale, le mostre virtuali, le monografie su argomenti tra i più vari che riguardano i BB.CC., ricercabili per autore, stile, epoca, tipologia di oggetto, contesto geografico o storico e via dicendo. I modelli di accessibilità ai siti per non vedenti attualmente disponibili non sono, però, ancora pienamente soddisfacenti, ma già esistono numerose sperimentazioni tese a migliorare sensibilmente la qualità di accesso e di interazione con l'utente. Anche per questa nicchia di utenza, dunque, siamo di fronte a un prevedibile consistente sviluppo, a condizione di implementare quei miglioramenti di cui vi è attesa.

Le ICT nella valorizzazione dei BB.CC.

Museo virtuale, mostre virtuali, ricostruzioni virtuali a due o a tre dimensioni, *monografie e documentari multimediali accessibili* via web o registrate su CD ROM o DVD ROM, sono tipologie diverse di espressioni ICT, prevalentemente indirizzate alla valorizzazione. Vale la pena ricordare che il concetto di valorizzazione nel mondo dei BB.CC. può avere il duplice significato di 'portare alla luce' valori propri dei BB.CC., che risultano di difficile accesso ai più, o addirittura creare valore aggiunto rispetto a quelli intrinseci, numerosi e polivalenti, che i BB.CC. già posseggono. Gli strumenti dell'ICT, 'in mani esperte', divengono mezzi potenti di valorizzazione secondo entrambi i significati. Qualche esempio. Un museo, una mostra, per comprensibili ragioni, vengono visitati da un numero limitato di persone. Attraverso il web, un CD, un DVD, quel museo quella mostra possono essere resi accessibili a una quantità enormemente maggiore di soggetti. La 'visita', naturalmente, è solo virtuale, nel senso che avviene attraverso il monitor di un computer.

Si tratta indubbiamente di una forma di fruizione penalizzata rispetto all'osservazione di un'opera in un museo, per quell'insieme complesso di messaggi ottici che rendono unico e irriproducibile il contatto visivo diretto. Ma allo stesso tempo, per via virtuale, si rende possibile una quantità di esplorazioni dell'opera diversamente impraticabili, che consentono di portarne alla luce elementi e valori espressivi inediti o addirittura sconosciuti. Lo strumento dello zoom, ad esempio, coniugato con effetti d'illuminazione virtuale, in un'opera bi o tri-dimensionale, permette di ingrandire e avvicinare all'osservatore dettagli dell'oggetto normalmente inaccessibili al visitatore, prospettive di osservazione nuove, plasticità dei rilievi insospettate. Quel capolavoro che è la Porta del Paradiso in bronzo dorato di Lorenzo Ghiberti, nel Battistero di Firenze, ha una potenza espressiva e iconografica che si estrinseca in non meno di tre livelli di osservazione.

Guardata da lontano, assume rilevanza il suo valore architettonico di straordinario *design*. Alla distanza di circa 2 metri, come solitamente la osservano i turisti, è un oggetto di squisito valore scultoreo per la mirabile composizione delle scene raffigurate in bassorilievo nelle dieci formelle principali. A un'osservazione molto ravvicinata, con una illuminazione semiradente (facilmente realizzabile con mezzi ICT su immagini digitalizzate o 3D), i bassorilievi si animano di una quantità di tali raffinati dettagli, nelle forme, nei volumi, nelle linee, nella precisione del segno, che lasciano sbalorditi e rendono conto delle capacità uniche del Ghiberti orafo. Le tecniche ICT, dunque, hanno veramente una straordinaria potenza di valorizzazione, grazie alla quale si riescono

a svelare aspetti delle opere antiche di inedita valenza emozionale, aspetti non di rado sconosciuti anche agli stessi esperti storici d'arte. Se dunque la fruizione virtuale è per certi aspetti penalizzata rispetto all'osservazione diretta, per molti altri può offrire vantaggi di indiscutibile importanza, generalmente a priori imprevedibili.

A livello di studio, e dunque ai fini della *Conoscenza*, le stesse tecniche consentono di effettuare confronti tra opere diverse accomunate da elementi di similitudine (per scene raffigurate, dettagli iconografici, uso del colore in figurazioni analoghe, metodi di realizzazione del disegno, proporzioni delle figure, ecc.). L'analisi morfologica e iconografica ne viene fortemente potenziata a tutto vantaggio di una più profonda conoscenza dei mezzi espressivi impiegati dagli artisti per realizzare i loro capolavori.

In una scheda specifica sono già stati esaminati a fondo i molteplici benefici che ai BB.CC. provengono dalle *tecnologie di digitalizzazione delle immagini*. In quella sede si è fatto solo un cenno alle *immagini digitali 3D*. Queste in effetti, rappresentano una vera conquista dell'ICT. Un'immagine 3D viene acquisita prevalentemente attraverso i *laser-scanner*, strumenti specifici che consentono di registrare sia da vicino ('a lettura ottica') sia anche a notevole distanza ('a tempo di volo') il rilievo di una superficie plastica con notevolissima precisione (intorno a circa 1mm nelle scansioni ravvicinate, dai 3 ai 20 mm nelle scansioni a distanza di decine fino a centinaia di metri). In fase di acquisizione vengono effettuate più scansioni con passi angolari diversi, che si completano in tempi estremamente rapidi e che consentono di rilevare agevolmente oggetti anche di grandi dimensioni compresi, naturalmente, edifici architettonici. *Software* specifici di *rendering* elaborano i dati in *nuvole di punti* e restituiscono *immagini a tre dimensioni (3D)*, le quali, attraverso ulteriori applicativi, possono essere 'rivestite', a perfetto registro, con immagini bidimensionali RGB (quindi normali immagini a colori) delle superfici tridimensionali rilevate.

L'aspetto finale di restituzione tridimensionale su monitor è notevolmente realistico rispetto a quello originale degli oggetti ripresi. Ma le possibilità veramente interessanti sono correlate al fatto che le riprese 3D sono di fatto *immagini metriche* ad elevato grado di precisione. Ciò significa che su di esse possono essere effettuati tutti i tipi di misurazione che si ritengono necessari. Per fare un esempio, la scansione 3D del David di Michelangelo ha poi consentito di misurarne tutte le dimensioni ivi compreso il volume. Da questo poi, attraverso il peso specifico del marmo, è stato ricavato il peso della statua ed è stata calcolata la posizione del baricentro per valutare quanto questo fosse collocato in posizione di sicurezza rispetto ai punti di appoggio del monumento.

A livello di strutture architettoniche, le immagini 3D costituiscono oggi uno degli strumenti fondamentali di cui si avvalgono gli studi di restauro architettonico. Il rilievo, i prospetti, ogni tipo di misurazione funzionale alla caratterizzazione delle strutture e alle operazioni di restauro vengono enormemente agevolati da questo tipo di rilevazioni. Altrettanto facilmente, poi, possono essere realizzate *ricostruzioni* di parti mancanti di edifici (o di statue), per valutare l'aspetto originario che esse prevedibilmente avevano prima del degrado, ma soprattutto, si possono simulare ipotesi di integrazioni, differenti soluzioni di restauro architettonico e strutturale per effettuare tutte le necessarie valutazioni prima di decidere quale possa essere la proposta d'intervento più rispondente. Le scansioni 3D devono dunque soltanto divenire di uso più comune e sistematico nelle attività dei BB.CC. così da essere sempre meglio calibrate per le esigenze di questo settore.

Le applicazioni dei GIS nei BB.CC.

Cartografia e geo-referenziazione costituiscono un ulteriore importante ambito di applicazione delle tecniche ICT nei BB.CC.. La geo-referenziazione è la tecnica che permette di associare a un dato, in formato digitale, una coppia di coordinate che ne fissino la posizione sulla superficie terrestre. Essa fa riferimento alle *procedure GIS (Geographical Information System)*, che sono strumenti

software per acquisire, memorizzare, estrarre, trasformare e visualizzare dati spaziali dal mondo reale. Nei BB.CC. queste tecniche sono suscettibili di utilizzi diversi. Si pensi, innanzitutto, alla cartografia tradizionale e la si confronti con le possibilità offerte da questi nuovi potenti sistemi che gestiscono dati digitali, con le ben note possibilità di controllo e manipolazione di questi, e al fatto che questi dati, proprio in quanto geo-referenziati, possono essere localizzati con una precisione assolutamente notevole in un determinato contesto territoriale. Una delle discipline che sembra poterne beneficiare in maniera particolare è senz'altro l'archeologia. Esistono cartografie satellitari su base sia visibile che in campi spettrali confinanti, con le quali è teoricamente possibile rilevare e posizionare rovine sepolte, invisibili a occhio, ma identificabili con altri tipi di radiazioni.

Anche nel settore della *Salvaguardia* la geo-referenziazione può giocare un ruolo di assoluta importanza nell'ambito di strategie preventive, correlando tra loro mappe di distribuzione dei beni in determinati territori con i rischi idrogeologico e/o sismico che eventualmente caratterizzino quei territori.

Anche nel *restauro architettonico* i sistemi di geo-referenziazione iniziano a diffondersi in quanto potenzialmente utili sotto vari punti di vista, ad esempio, per mappare le informazioni relative alle diverse tipologie di materiali impiegati o per posizionare i risultati degli esami diagnostici nel contesto esaminato così da acquisire la situazione generale del degrado, tipologia per tipologia, che interessa un certo oggetto, oppure per posizionare, e successivamente quantificare, i diversi trattamenti (pulitura, consolidamento, protezione, ecc.), che si ha in programma di effettuare.

L'elenco potrebbe continuare, ma il concetto importante di cui tener conto è che lo strumento della geo-referenziazione offre l'effettiva possibilità di dominare una quantità di informazioni diverse pertinenti a un determinato contesto, cosa che agevola in maniera determinante l'acquisizione del quadro generale della situazione.

Prospettive delle tecnologie ICT nei BB.CC.

Da quanto sopra illustrato è ben chiaro come vasto e incisivo possa risultare il ruolo delle tecnologie ICT nella maggioranza delle attività che riguardano i BB.CC.. Non a caso questo è proprio uno dei campi di applicazione per i quali maggiore è la possibilità di espansione delle moderne tecnologie. Le aziende se ne sono già accorte ed è ormai realtà, per molte di esse, un impegno specifico a migliorare, potenziare e soprattutto a rendere più rispondenti agli effettivi bisogni gli strumenti e gli applicativi. I tempi, d'altra parte, sembrano oggettivamente maturi affinché avvenga da parte del mondo dei BB.CC. quell'inversione di tendenza di cui da tempo vi è attesa, e cioè un atteggiamento di sempre crescente disponibilità verso quegli strumenti innovativi che portano indiscutibili benefici.

