



Marco Morandotti

Professore Associato in Architettura Tecnica presso l'Università di Pavia, è Direttore del Centro Interdipartimentale per la Conservazione dei Beni Culturali. Dal 2002 è responsabile delle attività scientifiche e di ricerca del laboratorio di Scienza e Tecnica per l'Edilizia e la Progettazione (STEP) presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DICAR) dell'Università di Pavia.

Contenuto vs. contenitore? Criteri predittivi di impatto e soglie di resilienza nella prospettiva del recupero sostenibile

Contents vs. container? Predictive impact criteria and resiliency limits in the perspective of sustainable refurbishment

Uno dei terreni sul quale si gioca la prospettiva del recupero sostenibile del patrimonio costruito è oggi costituito dalla valorizzazione del patrimonio stesso. Né un approccio intransigentemente refrattario alle istanze di riuso del bene, né quello opposto, orientato al contrario al suo sfruttamento economico, a carico di una troppo gravosa compressione delle stesse esigenze di conservazione, appaiono di fatto perseguibili in una prospettiva di medio periodo. A partire dagli esiti di una ricerca recentemente conclusa, si intende affrontare la questione con una prospettiva organica, in una logica "Life cycle oriented".

One of most relevant playground of the debate concerning the sustainable refurbishment of cultural heritage is focused on its valorisation. Neither a conservative approach, unavailable for every kind of heritage re-use, neither the opposite, devoted to its intensive economical exploitation, seem to be sustainable in a mid-term perspective. Moving on a recently ended research, the paper aims to stress the topic in a holistic "life cycle oriented" approach.

Parole chiave: recupero sostenibile; criteri di impatto; valorizzazione

Keywords: sustainable refurbishment; predictive impact criteria; valorisation

Uno dei terreni culturali ed operativi su cui impostare una credibile strategia di recupero sostenibile del patrimonio costruito è oggi costituito dalla valorizzazione del patrimonio stesso.

Quest'ultima è una sfida che lo stesso Codice dei Beni Culturali e del Paesaggio inquadra saldandola alla necessità di bilanciare le due categorie apparentemente antinomiche di conservazione e valorizzazione, sostenendo che "La valorizzazione consiste nell'esercizio delle funzioni e nella disciplina delle attività dirette a promuovere la conoscenza del patrimonio culturale e ad assicurare le migliori condizioni di utilizzazione e fruizione pubblica del patrimonio stesso, anche da parte delle

persone diversamente abili, al fine di promuovere lo sviluppo della cultura. Essa comprende anche la promozione ed il sostegno degli interventi di conservazione del patrimonio culturale"¹, e soprattutto rimarcando che "La valorizzazione è attuata in forme compatibili con la tutela e tali da non pregiudicarne le esigenze"².

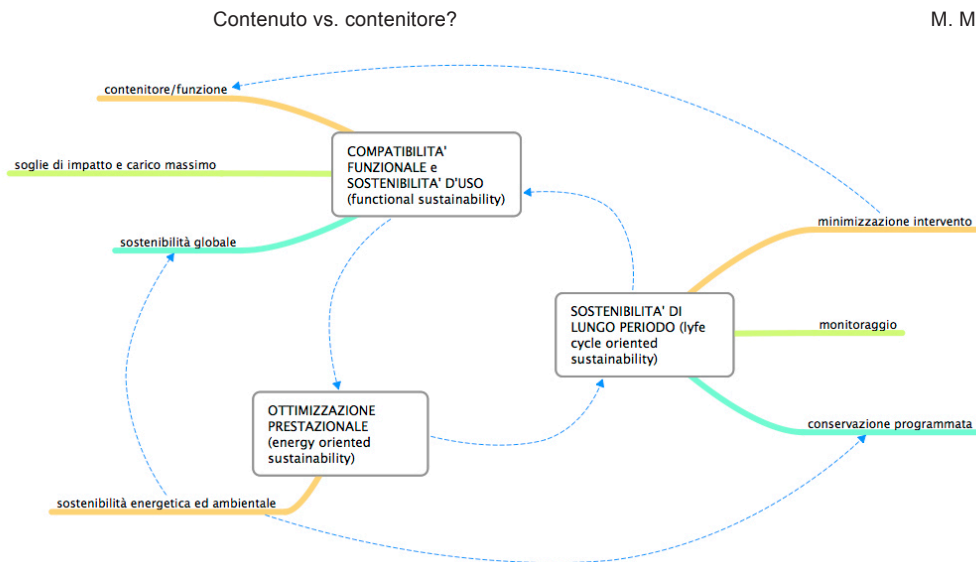
Né un approccio intransigentemente refrattario alle istanze di riuso del bene, né quello opposto, orientato al contrario al suo sfruttamento economico, a carico di una troppo gravosa compressione delle stesse esigenze di conservazione, appaiono di fatto sostenibili in una prospettiva di medio periodo.

Il Codice stesso sottolinea a più riprese la

necessità di porre attenzione alle scelte di utilizzo del bene, vincolando tali indicazioni a principi più generali di compatibilità con l'organismo edilizio stesso.

In particolare il Codice, affrontando il tema dell'alienabilità di immobili appartenenti al demanio culturale, rimarca come l'autorizzazione ministeriale alla alienazione non possa essere rilasciata "qualora la destinazione d'uso proposta sia suscettibile di arrecare pregiudizio alla conservazione e fruizione pubblica del bene o comunque risulti non compatibile con il carattere storico e artistico del bene medesimo. Il Ministero ha facoltà di indicare, nel provvedimento di diniego, destinazioni d'uso ritenute compatibili con il carattere del bene

Fig. 1 - Schema generale delle tre dimensioni della sostenibilità nel recupero dei beni culturali. La dimensione funzionale, quella energeticamente orientata in termini di miglioramento delle performance energetiche della fabbrica, e infine quella Life Cycle oriented, connessa alla conservazione programmata.



e con le esigenze della sua conservazione”³. L’analisi del concetto di valorizzazione del patrimonio, così come definita nel Codice, non può essere affrontata disgiuntamente dalla analisi di due ulteriori endiadi: il rapporto tra valorizzazione e riuso da un lato e il rapporto tra valorizzazione e gestione dall’altro.

La prospettiva complessiva di un recupero sostenibile del patrimonio non può quindi che passare da un sistema integrato di approccio che tiene in considerazione tre differenti aspetti di indagine:

1. la valutazione della compatibilità funzionale tra una destinazione d’uso e il contenitore edilizio storico, sia rispetto alla decisione di una rifunzionalizzazione dello stesso, sia

rispetto alla compatibilità tra le funzioni insediate nel contenitore medesimo rispetto alle esigenze della utenza attuale o rispetto alle necessità di adeguamento normativo, funzionale e impiantistico rese necessarie dalla normativa o in generale della messa in crisi di paradigmi di adeguatezza di fruizione;

2. la prospettiva di una ottimizzazione delle performance del contenitore edilizio in relazione alla sua consistenza materica e allo stato di conservazione residuo, ma nella prospettiva di un incremento della sua efficienza energetica;
3. la sostenibilità di lungo periodo dell’intervento, nella prospettiva di una minimizza-

zione degli interventi conservativi, attraverso una strategia organica di monitoraggio finalizzato alla conservazione programmata del bene.

NECESSITÀ, LIMITI E VINCOLI DEL RIUSO

Una strategia effettiva di riuso sostenibile per un edificio esistente non può che fondarsi su una adeguata valutazione preliminare dell’impatto potenziale della nuova funzione da insediarsi, rispetto alla consistenza materica del manufatto esistente. Si tratta cioè di determinare con sufficiente attendibilità l’effettiva compatibilità spaziale e funzionale tra il programma di attività previste dal piano di riuso, rispetto alla necessaria esigenza di conserva-

zione dei valori storico-documentali e più in generale della consistenza materica del bene stesso.

Questa procedura valutativa deve avere luogo in una fase del tutto preliminare del processo progettuale, in quanto solo dalla positiva conclusione di questa fase possono discendere opzioni progettuali consapevoli del rispettivo impatto sul bene vincolato. Allo stesso modo questa fase potrebbe essere caratterizzata da una valutazione comparativa tra opzioni progettuali differenti, in modo da valutare differenti scale di impatto e quindi da ottenere una procedura analitica di confronto normalizzata. Si tratta in altri termini di procedere ad una valutazione globale di compatibilità d'uso, che deve procedere secondo tre fasi distinte, ma intrecciate e convergenti:

1. la determinazione dell'impatto atteso tra la nuova destinazione d'uso (o la medesima destinazione a valle di significativi adeguamenti normativi) e il contenitore;
2. la determinazione di specifiche soglie di fruizione per l'edificio stesso, determinate in relazione alle ipotesi funzionali precedentemente valutate;
3. la valutazione globale della sostenibilità dell'intervento, sotto il profilo tecnico e gestionale.

La prima fase, ovvero quella di "determinazione di impatto" deve muovere da due parallele azioni di *assessment*: quello dei vincoli propri del contenitore edilizio storico, di natura mor-

fologica, strutturale, tecnologia, materica e strettamente conservativa, e quello delle richieste, a loro volta prestazionalmente determinate rispetto al quadro delle esigenze connesse alle destinazioni d'uso ipotizzate e dei requisiti, ambientali e tecnologici, necessari al loro soddisfacimento.

La seconda fase, ovvero quella delle "valutazione delle soglie di fruizione" deve arrivare alla determinazione del carico di esercizio massimo per il bene, portando a convergenza una procedura di ottimizzazione che integri da un lato i limiti superiori di esercizio del bene e dall'altro i limiti inferiori di utenza, tenuto conto delle istanze potenzialmente divergenti, ma che invece devono essere ricondotte a sintesi positiva, della conservazione e della valorizzazione del bene stesso.

La terza fase, ovvero quella della "valutazione globale di accettabilità" dell'intervento deve fornire una valutazione preliminare sintetica della resilienza del sistema determinato dalla interazione delle istanze di conservazione del bene, di soddisfacimento delle esigenze dell'utenza, e di sostenibilità gestionale dell'intervento.

Nell'ipotesi di intervento su un bene storico, in cui sia prevista una nuova assegnazione funzionale al contenitore edilizio, la pre-determinazione del livello di impatto della nuova destinazione d'uso risulta essenziale nella logica di un approccio sostenibile alla conservazione del bene, dal momento che solo questa

fase pre-progettuale potrà portare alla determinazione delle richieste di trasformazione o adeguamento indotte dalla scelta funzionale, consentendo quindi una valutazione di compatibilità con le istanze di conservazione.

Al fine di poter meglio delineare i requisiti del progetto rispettoso sia della nuova funzione sia della fabbrica esistente, può risultare utile attenersi alla definizione e articolazione del concetto di qualità in:

- funzionale/spaziale: intesa come fruibilità, adeguatezza e sicurezza degli spazi;
- ambientale: requisiti di benessere;
- tecnologica: requisiti tecnologici di durabilità, manutenibilità e sicurezza all'uso;

L'analisi della consistenza della fabbrica deve riguardare una valutazione, ancorché speditiva, di alcuni aspetti essenziali. Tra questi vanno ricordati in prima istanza gli aspetti geometrico/dimensionali della fabbrica, sia in termini di superfici disponibili che di connessioni distributive orizzontali e verticali, al pari dei dati materici connotanti le superfici interne, sia delle partizioni verticali che di quelle orizzontali. Va sottolineato come questa indagine non si configuri come il tradizionale rilievo geometrico e materico sviluppato tipicamente nella fase progettuale di conoscenza del bene, ma costituisca una più celere schematizzazione dei sistemi distributivi, nella logica di una valutazione meta-progettuale di compatibilità con il set di funzioni previste attraverso la redazione di matrici di prossimità e connessione

tra i diversi ambiti funzionali e spaziali interni. La distinzione è rilevante sotto il profilo operativo e della applicabilità concreta delle metodologie proposte, dal momento che non si intende prospettare una ridondante duplicazione di indagini materico/morfologiche, né una irragionevole anticipazione di fasi analitiche di dettaglio, tipicamente inquadrabili in una successiva fase del processo progettuale e realizzativo, quanto piuttosto suggerire una distinta e preliminare fase cognitiva che tenda ad estrarre dalla lettura della consistenza del bene le sue effettivi radici costitutive, tanto in relazione alla articolazione spaziale, quanto alla composizione materica che sullo stato di conservazione.

Questa analisi spaziale e materica deve essere affiancata da una analoga ricognizione dei sistemi ambientali e tecnologici allo stato pre-intervento in modo da definire il set di prestazioni ambientali residue fornite dall'organismo edilizio nel suo complesso, tanto in termini di livello prestazionale dell'involucro rispetto ad esempio alle specifiche di trasmittanza, sfasamento termico e isolamento acustico, quanto in termini di orientamento e giaciture per le possibili ricadute in termini ad esempio di soleggiamento e illuminazione naturale degli spazi confinati. A questa lettura ambientale deve essere affiancata una lettura tecnologica tesa a verificare l'eventuale esistenza di reti tecnologiche esistenti e la loro efficienza residua. Qualora anche le singole

reti dovessero risultare insufficienti o inadeguate, può risultare di estrema importanza nella prospettiva di un recupero sostenibile, il riconoscimento, ad esempio di sistemi di distribuzione, che potrebbero essere reimpiagati, ancorché con differenti alloggiamenti impiantistici per le reti di nuova realizzazione. Una simile lettura dell'organismo edilizio determina come prodotto pre-progettuale una mappatura insieme analitica e concettuale delle risorse residue del contenitore e dei suoi gradi di vincolo, materici, geometrici e costitutivi. Questo set di informazioni risulta essenziale quale punto di confronto per le successive fasi di indagine finalizzate alla pre-verifica di inserimento funzionale.

Questa fase infatti prende le mosse da una analisi prestazionale di tipo classico centrata sulla ipotesi di riuso ipotizzata, attraverso la scansione di fruitori/attività/classi di esigenze/requisiti di fruizione.

La declinazione specifica di questa lettura meta-progettuale della organizzazione funzionale, spaziale e tecnologica della funzione da insediare consiste proprio nella disponibilità di dati e parametri di confronto acquisiti con una metodologia specifica sul corpo di fabbrica oggetto di intervento. L'analisi delle esigenze di fruizione infatti, divisa in sistema ambientale/spaziale e sistema tecnologico, è finalizzata non solo ad individuare una specifica risposta prestazionale, quanto piuttosto a mettere quest'ultima in reazione al corrispon-

dente sistema di vincoli precedentemente determinato. Così ad esempio la quantificazione della necessità di spazi e di priorità di connessioni funzionali, oppure il sistema delle esigenze di accessibilità nella prospettiva di una fruizione estesa del patrimonio culturale non restano singole valutazioni pre-progettuali, ma trovano un immediato momento di confronto con la lettura dimensionale della fabbrica svolta in precedenza. Allo stesso modo, la definizione del pacchetto esigenziale e prestazionale del benessere nelle sue diverse accezioni, trova immediato riscontro nei dati che emergono dalla ricognizione delle prestazioni ambientali residue e della efficienza delle reti tecnologiche eventualmente presenti.

Va sottolineato che l'obiettivo conclusivo di questo doppio sistema di analisi e confronto non è evidentemente l'individuazione delle soluzioni tecnico costruttive spaziali, ambientali e tecnologiche per portare a soddisfacimento le esigenze dell'utenza, come potrebbe accadere in un tradizionale processo progettuale, quanto piuttosto individuare gli eventuali scostamenti attesi da queste soglie di soddisfacimento e operare su questi una singola valutazione delle soglie di resilienza del sistema, in termini di alterazioni sopportabili senza che da ciò possa derivare una compromissione eccessiva dei suoi valori storico-documentali. In ciò risiede d'altra parte il senso di una valutazione di impatto così anticipata rispetto alla definizione compiuta di un effettivo processo pro-

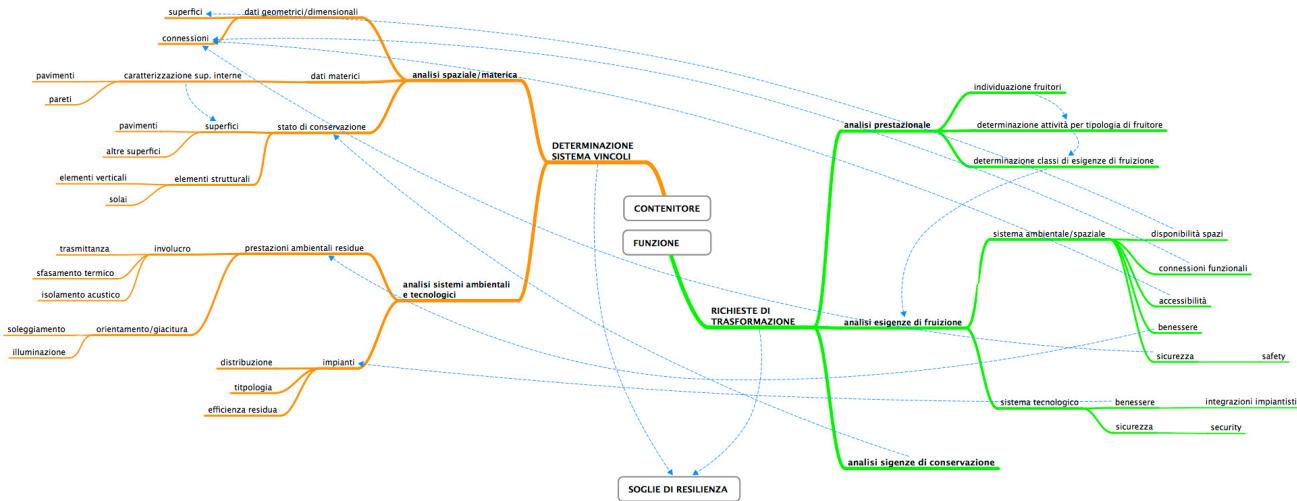


Fig. 2 - Schema generale delle relazioni tra contenitore e funzione nelle prospettive del recupero sostenibile.

gettuale, proprio perché solo in questo modo possono essere eventualmente svolte quelle campagne analitiche comparative tra differenti opzioni funzionali e di destinazione d'uso, cui la normativa fa espresso riferimento.

Una volta valutata in termini positivi la compatibilità tra contenitore edilizio e destinazione d'uso, qualora quest'ultima sia di tipo pubblico, un approccio effettivamente orientato al recupero sostenibile del bene deve affrontare la questione delle soglie di utilizzo o di carico del bene stesso.

Si rende in altri termini necessario provvedere alla determinazione delle modalità di fruizione pubblica del bene stesso, sia in termini organizzativi che, soprattutto quantitativi.

Una proposta metodologica in questo senso può arrivare dalla lettura e dalla contestuale reinterpretazione degli approcci scientifici orientati alla determinazione della capacità di carico dei sistemi biologici o ambientali complessi.

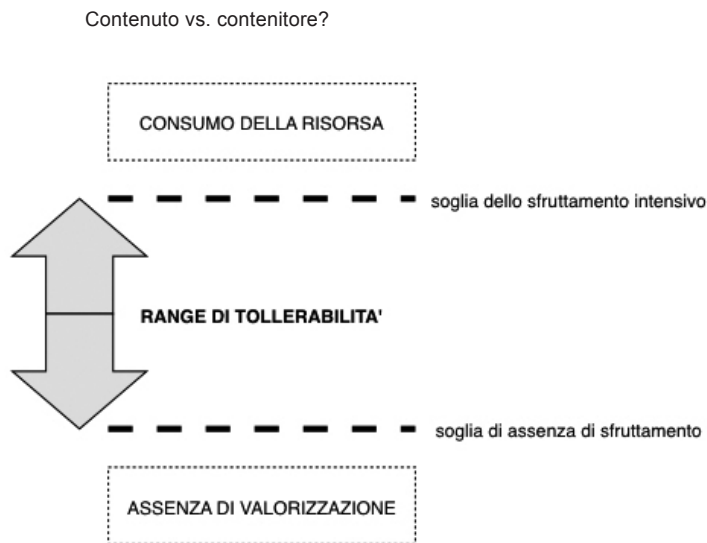
In termini generali, la questione si pone nei termini di determinare il livello massimo sostenibile di fruizione di una risorsa culturale (nello specifico una risorsa edilizia) senza da un lato alterazioni inaccettabili del bene sotto il profilo della sua conservazione, e senza d'altro canto compromettere eccessivamente il livello di qualità dell'esperienza stessa di fruizione.

Si tratta cioè di determinare in via predittiva le

soglie di pressione degli utilizzatori dell'edificio e contestualmente la capacità di risposta e di adattamento di questo, sia nella sua componente materico-edilizia, che tecnologico-impiantistica. In via generale possono essere considerate due differenti fasce di oscillazione dei valori ottenibili sia rispetto all'uso dell'edificio, sia rispetto all'impatto tra la funzione e lo stesso.

Nel primo caso si tratta di individuare l'intensità d'uso programmata (ad esempio in termini di visitatori/giorno o visitatori/ora) avendo cura di mantenere ricompreso tale valore tra un limite superiore, dato dalla soglia di degrado irreversibile del bene indotto da fattori di carico antropico legati ai fruitori stessi, e un limite in-

Fig. 3 - Schema sintetico dei range di tollerabilità dello sfruttamento di una risorsa.



M. Morandotti

feriore, dato dalla soglia di perdita di interesse alla fruizione del bene. È bene ricordare che tali fasce di fruizione, legate alle specificità di ogni singolo intervento, e quindi certamente non predeterminabili in assoluto, sono in realtà sistemi dinamici e interrelati. Si potrebbe cioè dare il caso di un possibile spostamento verso l'alto della fascia di utilizzo, attuando misure compensative rispetto alla alterazione dello stato di equilibrio interno della fabbrica. Sovente tuttavia si tratta di strategie di risposta basate su un incremento delle dotazioni impiantistiche installate nell'edificio, con le conseguenti criticità connesse al loro stesso impatto sulla consistenza materica del bene e ai valori guida della sua conservazione.

Le procedure di modellazione da adottare in questo caso fanno riferimento alla ricerca di un equilibrio tra due sistemi dinamici: quello legato alle esigenze degli utilizzatori, prevalentemente orientato da parametri di benessere igrometrico e luminoso, e quello legato alle esigenze di conservazione degli spazi confinati, e degli eventuali beni mobili in essi contenuti. La risposta analitica che è possibile ottenere in questi casi non ha il carattere di un valore specifico, quanto piuttosto di una fascia di oscillazione tra valori minimi e massimi, il cui limite superiore è dato dal carico di utenza che genererebbe per il suo impatto antropico il degrado irreversibile del bene e il cui limite inferiore è quello dato dalla soglia di fruizione

più bassa, al di sotto della quale il bene non può più essere considerato oggetto di valorizzazione per i numeri troppo esigui di fruitori. Nei diversi modelli analitici adottati per la determinazione della capacità di carico nei sistemi ecologici ed ambientali, per i quali si sono sviluppate le prime esperienze internazionali di approccio al tema, ricorre sovente la articolazione tra la valenza ambientale ed ecologica del tema, legata usualmente a parametri fisici dati e in quanto connessi al contesto territoriale di riferimento, non modificabili in sede di pianificazione e sviluppo, e la valenza strutturale del contesto, intendendo ricompresi in questa categoria gli aspetti più propriamente infrastrutturali, quali ad esempio la

viabilità di accesso all'area e gli eventuali interventi di mitigazione dell'impatto antropico. Questo secondo aspetto del problema risulta quindi intrinsecamente legato a questioni che consentono alcun gradi di libertà dal punto di vista della risposta progettuale, in quanto l'assetto dell'infrastrutturazione di accesso ad un comparto ambientale, rientra nell'ambito dei parametri modificabili.

Un approccio analogo al tema della valutazione della capacità di carico dei beni monumentali può parimenti strutturarsi su due ambiti interdipendenti, ma connotati da gradi assai diversi di agibilità progettuale.

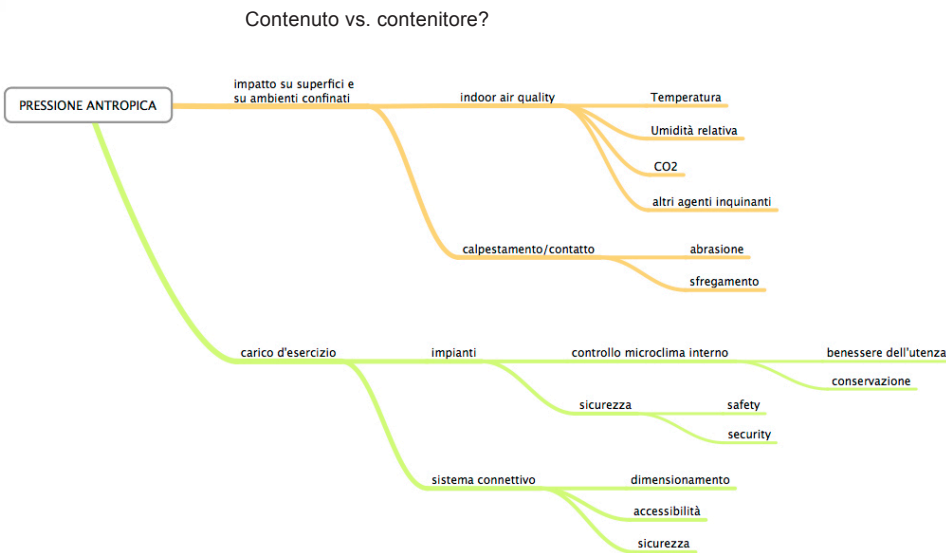
Da un lato si hanno alcuni elementi tipicamente invarianti del problema, tra cui, esem-

plificativamente, gli aspetti dimensionali della fabbrica, le sue caratteristiche materiche e costruttive, nonché il suo livello di degrado e le necessarie prescrizioni per la sua conservazione. Ciascuno di questi aspetti deve essere già stato valutato rispetto alla possibilità di inserimento funzionale della nuova destinazione d'uso nel contenitore preesistente, nella precedente fase di analisi, mentre in questo caso ciascuno di questi elementi viene indagato rispetto alla sua compatibilità con specifiche soglie di carico di fruizione.

D'altro canto esistono anche alla scala dell'edificio alcuni aspetti di "infrastrutturazione" del bene, legati proprio alla sua fruizione che possono essere oggetto di una proposta mo-

dificativa. Basti per tutto ricordare da un lato gli aspetti connessi ai sistemi distributivi interni, sia legati alla accessibilità del bene, sia legati alla mobilità dei fruitori all'interno di essi e alla sicurezza, intesa tanto come *safety*, ovvero fruizione sicura del bene, quanto come *security*, ovvero messa in sicurezza del bene e del suo contenuto da eventi calamitosi e da atti dolosi condotti ai suoi danni. Allo stesso modo in questa categoria può essere ricompresa la dotazione impiantistica finalizzata al controllo dei parametri igrometrici interni e al controllo degli inquinanti aerei negli spazi confinati. Si tratta però in questi casi di gradi di libertà fortemente condizionati non solo dalle caratteristiche intrinseche dell'oggetto,

Fig. 4 -Schema riepilogativo dei diversi fattori che determinano la pressione antropica su un bene.



ma soprattutto dalle imprescindibili istanze di conservazione che ne devono presiedere la valorizzazione.

Si tratta cioè in ultima istanza di determinare il numero di visitatori in grado di fruire in modo soddisfacente del bene, senza che questo ne risulti compromesso, consentendo allo stesso tempo la sostenibilità economica dell'intervento. Proprio su questo specifico tema si misura, forse più acutamente che su altri, la questione del *trade-off* tra conservazione e valorizzazione del bene culturale.

In particolare, gli aspetti più problematici in relazione ai quali determinare dei vincoli sostenibili di fruizione possono essere ricondotti a due classi:

1. parametri connessi alla conservazione dell'edificio e dei beni mobili eventualmente in esso contenuti:
 - a. controllo della qualità dell'aria
 - i. controllo parametri termo-igrometrici [T; U.R.]
 - ii. controllo degli inquinanti (CO₂, NOX,...)
 - b. verifica predittiva sulla vulnerabilità delle superfici
 - i. materiali finitura delle partizioni orizzontali
 - ii. materiali di finitura delle partizioni verticali
2. specifiche connesse all'adeguamento normativo per la fruizione in sicurezza del bene:

- a. benessere dei fruitori (laddove questo non sia in contrasto con le esigenze di conservazione del bene)
- b. sicurezza antincendio
- c. vulnerabilità sismica
- d. accessibilità
- e. igiene

Con riferimento ai parametri di controllo dei fattori ambientali, un elemento dirimente è il numero di utenti presenti all'interno dell'ambiente, dato che questo può determinare un aumento cospicuo di CO₂ nell'aria, variazioni di umidità e temperatura, provocando cambiamenti anche significativi in termini non solo di comfort ma anche rispetto alla conservazione dei manufatti beni, sia immobili (ad esempio

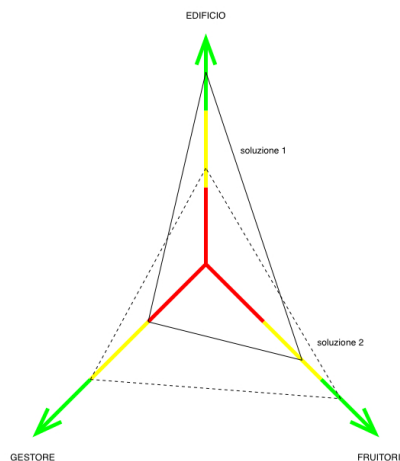


Fig. 5 - Valutazione sintetica del grado di soddisfacimento delle istanze complessive di conservazione, di fruizione e di gestione del bene. Il segmento rosso dello schema rappresenta il raggiungimento di una soglia di inaccettabilità inferiore.

superfici decorate, tappezzerie, stucchi), sia mobili (arredi, oggetti esposti).

Se con la prefigurazione dell'impatto di una nuova destinazione d'uso del contenitore su una struttura storica è possibile effettuare valutazioni fondate sulla congruità di una soluzione funzionale rispetto ad altre, con la valutazione delle soglie sostenibili di carico è possibile tentare di ricomporre altre contraddizioni che governano il processo decisionale:

1. fruizione vs. conservazione, dal momento che
 - a. il numero massimo di utenti-fruitori contemporaneamente presenti nel monumento viene, come detto in precedenza, verificato rispetto al carico massimo tollerabile dalle

- istanze di conservazione della struttura;
2. benessere vs. conservazione, dal momento che
 - a. le condizioni di comfort ambientale interno dei fruitori possono essere perseguite e raggiunte solo a condizione che i sistemi impiantistici necessari sia debitamente integrati nell'edificio senza procurare nocumento alle istanze di conservazione,
 - b. le condizioni microclimatiche interne relative al benessere degli utenti non siano in contrasto con i valori microclimatici necessari alla conservazione del bene, con particolare riferimento alle superfici interne e alle eventuali opere esposte
3. fruizione vs. sostenibilità economica

dell'intervento, dal momento che
a. la compressione del numero di fruitori conseguente alla minimizzazione del carico antropico indotto direttamente o indirettamente sulle superfici interne, non sia tale da rendere di fatto insostenibile la gestione dell'intervento nel medio termine.

In conclusione è possibile quindi affrontare positivamente il tema di una valutazione preliminare della sostenibilità dell'intervento attraverso la determinazione di un insieme integrato di capacità, distribuite su tre livelli principali.

1. la capacità dell'edificio, intesa come soglia d'uso o di trasformazione oltre il quale il

- bene è irrimediabilmente compromesso
2. la capacità dell'utente, intesa come soglia di accettabilità delle limitazioni funzionali o ambientali alla esperienza di fruizione
 3. la capacità del gestore, intesa come la soglia di accettabilità economico/gestionale dei limiti di fruizione.

L'OTTIMIZZAZIONE PRESTAZIONALE DELL'ESISTENTE

La prospettiva di un approccio sostenibile alla conservazione del costruito, non può che passare anche dal tentativo di ottimizzarne il comportamento energetico, al fine di ridurre gli oneri necessari alla gestione, attraverso la definizione di raccomandazioni che possa-

no produrre un miglioramento dell'efficienza energetica e che permettano lo sfruttamento di fonti di energia rinnovabili.

Il tema è stato affrontato da una ricerca recentemente conclusasi nell'ambito delle attività scientifiche del Centro Interdisciplinare di Studi e Ricerche per la Conservazione dei Beni Culturali (CISRIC) dell'Università di Pavia, presso il Laboratorio di Scienza e Tecnica per l'Edilizia e la Progettazione (STEP) del Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura (DI-CAR). La ricerca, dalla chiara impronta pluridisciplinare, commissionata da ENEA, ha avuto per oggetto lo "Studio, sviluppo e definizione di linee guida per interventi di miglioramento per l'efficienza energetica negli edifici di

pregio e per la gestione efficiente del sistema edificio-impianto".

Obiettivo è stato la definizione di un primo nucleo metodologico finalizzato alla definizione di linee guida per l'integrazione di soluzioni tecnologiche orientate all'efficienza energetica e all'uso di fonti rinnovabili in apparecchiature costruttive storiche, finalizzato alla stesura di matrici di valutazione di possibili strategie di intervento, esportabili su differenti contesti, piuttosto che non su un abaco esaustivo di possibili soluzioni specifiche. La ricerca, nel suo complesso, è stata articolata in tre distinte linee tematiche:

1. protocolli di indagine, diagnostica e monitoraggio,

2. procedure di analisi e linee guida per l'intervento,

3. proposta di indicatori di qualità ambientale. Verranno nel seguito riportati alcuni elementi specifici, relativi all'approccio metodologico per la valutazione preliminare delle ipotesi di intervento⁴.

Il patrimonio di conoscenze acquisite in termini di caratterizzazione microclimatica degli ambienti interni e delle conseguenti dinamiche di degrado dei materiali e beni in essi presenti, descritte in precedenza, costituiscono evidentemente la base conoscitiva fondamentale per la possibile individuazione delle tecnologie volte a migliorare l'efficienza energetica del bene, tenendo in considerazione quali obiettivi di progetto le condizioni termo-igrometriche necessarie non solo per il raggiungimento di livelli adeguati di comfort dell'utenza, ma anche congruenti con le necessità di una corretta conservazione del manufatto.

Risulta chiaro che rispetto all'ampia casistica delle soluzioni tecnologiche oggi disponibili ai fini del miglioramento dell'efficienza energetica dell'edificio, una significativa limitazione di impiego sarà determinata proprio dalla consistenza materica e monumentale dell'edificio stesso.

Coerentemente con l'approccio generale precedentemente descritto, anche nel caso in cui l'intervento sul bene esistente non riguardi la rideterminazione della sua destinazione d'uso, o la verifica dei carichi di utenza massima,

ma si limiti alla individuazione di possibili interventi di ottimizzazione del comportamento energetico, al fine di individuare strategie progettuali compatibili con l'esistente, è necessario in primo luogo approfondire la conoscenza della fabbrica per evidenziare potenzialità e vincoli per il suo miglioramento energetico.

In questa prospettiva la fase di *assessment* prestazionale è orientata ad acquisire l'insieme di elementi utili alla comprensione del comportamento energetico dell'edificio. I principali elementi d'indagine sono la morfologia e l'orientamento dell'edificio ed i caratteri costruttivi dell'involucro. Risulta infine necessario investigare in merito alla presenza e alle caratteristiche di sistemi impiantistici esistenti al fine di verificarne l'efficienza e l'efficacia residue e le possibili trasformazioni e integrazioni.

Tali valutazioni devono essere affiancate da una precisa caratterizzazione materica dei manufatti, finalizzata alla definizione del set di parametri ambientali da perseguire per la conservazione del bene.

In questa fase di analisi convergono anche le indagini relative allo studio delle dispersioni energetiche finalizzato ad individuare le principali criticità nel comportamento dell'organismo edilizio e il fabbisogno atteso di energia dell'edificio, in ragione delle opzioni funzionali previste. L'insieme di questi dati analitici e previsionali costituirà un benchmark rilevante nelle successive fasi di definizione progettua-

le e fungerà anche da parametro di confronto con i livelli prestazionali raggiunti a valle degli interventi di efficientamento.

La conoscenza dell'assetto morfologico e distributivo della fabbrica assume una importanza significativa dal momento che può incidere in modo diretto o indiretto sulle prestazioni complessive dell'organismo e sulla sua risposta ai dati climatici esterni. La sua analisi risulta rilevante non solo in relazione alla collocazione al suolo dell'edificio e al suo orientamento solare prevalente, ma anche in relazione alla maggiore o minore compattezza planivolumetrica dell'insieme. Da ciò derivano tanto la presenza e l'eventuale rilevanza di ombreggiamenti su porzioni delle chiusure verticali, quanto più in generale il fattore di forma del corpo di fabbrica. Da quest'ultimo dipende a sua volta la maggiore o minore propensione dell'edificio alla dispersione del calore.

Benché sia evidente che confrontandosi con edifici esistenti, sovente di rilevanza storica, sia di norma precluso fare riferimento a strategie consuete di ottimizzazione sia in termini di protezione dell'involucro (ad esempio mediante sistemi esterni di ombreggiamento, fissi o mobili), sia in termini di captazione e guadagno gratuito (serre solari), la lettura analitica di questi aspetti rimane ugualmente significativa, dal momento che ad esempio il fattore di esposizione solare può determinare in condizioni estive scostamenti non trascurabili nel microclima interno di alcune porzioni

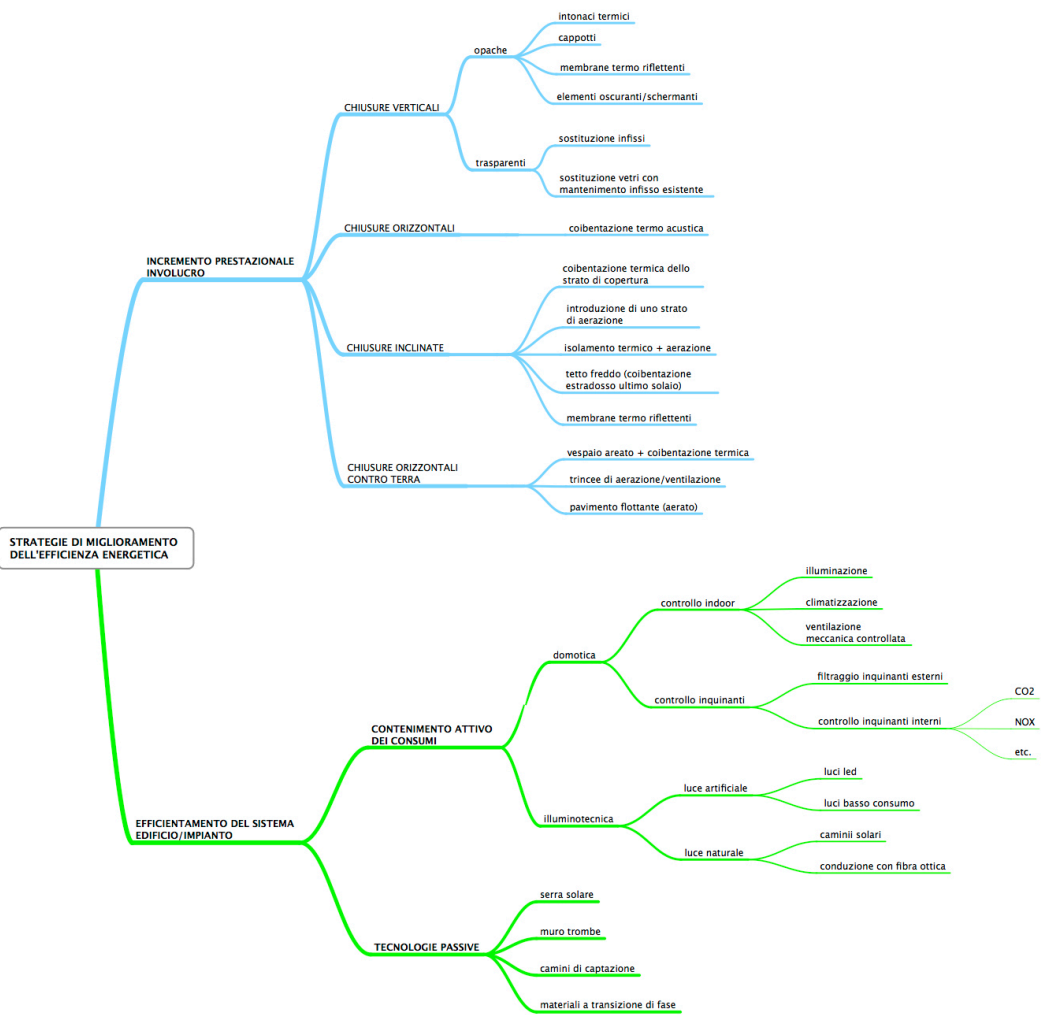
Fig. 6 - Schema complessivo delle strategie di miglioramento dell'efficienza energetica di un edificio

dell'edificio e quindi richiedere una differente risposta impiantistica per garantire le condizioni di comfort interno richieste.

La conoscenza dei sistemi tecnologici e costruttivi della fabbrica e dei suoi principali sub-sistemi è evidentemente essenziale ai fini della comprensione del suo comportamento ambientale rispetto alle sollecitazioni esterne. L'analisi tecnologica e prestazionale deve essere svolta su tutti i fronti dell'involucro: chiusure verticali, chiusure orizzontali e inclinate. Essa è diretta a quantificare i valori di trasmittanza di ciascuno di questi elementi e degli eventuali ulteriori sub-sistemi tecnologici presenti. Risulta parimenti importante determinare il valore di sfasamento termico

Contenuto vs. contenitore?

M. Morandotti



dell'involucro al fine di ottimizzare il comportamento dei sistemi tecnologici impiantistici. È infatti noto come le membrature murarie continue degli edifici storici, in ragione della loro elevata inerzia termica possano garantire una risposta prestazionale più che soddisfacente in condizioni estive.

È peraltro evidente che, solo la definizione delle funzioni ospitate dall'edificio, e quindi il quadro esigenziale generato dalle attività in esso svolte determinano il set di requisiti prestazionali e la risposta impiantistica richiesta. In particolare va osservato come destinazioni specifiche, quali quelle museali/espositive, richiedano il controllo attento di parametri termo-igrometrici differenti dalla sola temperatura, quali ad esempio umidità relativa e, talora, densità di CO₂.

La fase di *assessment* prevede infine in questo caso la caratterizzazione microclimatica interna dell'edificio e l'analisi del suo comportamento energetico prima degli interventi. I dati raccolti costituiscono una sorta di analisi preliminare dello stato di fatto. Segue, dunque, la valutazione degli impatti che i possibili interventi e le azioni possono avere sul contenitore, partendo da un livello generale, in cui vengono considerate tutte le possibili strategie di miglioramento dell'efficientamento energetico di un edificio, fino a giungere alla definizione dei requisiti richiesti, al fine di garantire determinati livelli di prestazione e comfort ambientale, nonché la conservazione degli ele-

menti storici (es. mobili lignei, tappezzerie, pavimentazioni).

Attraverso la lettura incrociata degli obiettivi di sostenibilità, delle esigenze connesse all'uso e dei vincoli dell'edificio storico, è possibile definire una griglia sinottica di valutazione per la selezione delle ipotesi progettuali ammissibili in quanto idonee al soddisfacimento delle esigenze di progetto e compatibili con le strutture esistenti.

Le possibili strategie da perseguire nella prospettiva di un incremento della sostenibilità energetica di strutture esistenti sono riconducibili da un lato alla diminuzione della dispersione del calore con conseguente riduzione dell'energia consumata e dall'altro all'inserimento di sistemi per la produzione e lo sfruttamento di energia da fonti rinnovabili. Alla luce delle specificità di ogni singolo caso applicativo risulta quindi necessario definire le strategie possibili ai fini del miglioramento energetico per poi individuare quelle effettivamente compatibili con la fabbrica, proprio in ragione delle valutazioni di compatibilità prestazionale e di conservazione definite in precedenza.

La valutazione delle prestazioni energetiche di un edificio viene comunemente integrata con una valutazione della sua "qualità ambientale", principio su cui si basano i più recenti sistemi di certificazione, i quali hanno lo scopo di valutare le prestazioni energetico - ambientali di un edificio secondo criteri di sostenibilità ambientale e analizzando le sue caratteri-

stiche durante il suo ciclo di vita.

I differenti sistemi di certificazione internazionalmente riconosciuti si fondano su sistemi di valutazione differentemente concepiti, ma che prendono comunque in considerazione il consumo delle risorse naturali (energia, acqua, territorio), i carichi ambientali prodotti (emissioni inquinanti, impatto sul territorio), il comfort e la qualità ambientale (indoor e outdoor), la flessibilità e la qualità del servizio. Non è questa la sede per una disanima comparativa dei differenti metodi di valutazione della sostenibilità di un intervento edilizio, specificamente declinato come intervento su una fabbrica esistente, di valore storico.

Si è optato per impostare le schede di valutazione di compatibilità degli interventi di ottimizzazione energetica a partire da alcuni ambiti tematici cui fa riferimento il noto Protocollo ITACA, e in particolare:

- a. Qualità del sito
- b. Consumo di risorse
- c. Carichi ambientali
- d. Qualità ambientale indoor
- e. Qualità del servizio

Come già ricordato, il processo di efficientamento energetico di un edificio storico deve passare attraverso una specifica valutazione di compatibilità degli interventi possibili, in relazione alle specificità del bene. Si è quindi provveduto a definire alcune tabelle sinottiche di comparazione tra specifiche opzioni di intervento e gradi di ammissibilità (da valutare

specificamente in ogni singola circostanza di applicazione), mettendole in relazione con gli ambiti tematici individuati precedentemente. A titolo esemplificativo si riporta nel seguito la tabella relativa all'insieme di opzioni progettuali finalizzate all'incremento prestazionale dell'involucro.

È, dunque, opportuno considerare le principali minacce ambientali che possono mettere a rischio la conservazione, nonché i parametri termo-igrometrici indicati da prescrizioni e normative di riferimento. È necessario definire, sulla base della caratterizzazione materica svolta, il degrado eventualmente riscontrato, nonché un'analisi dei rischi potenziali per i manufatti presi in esame. Controllare la qualità dell'aria non significa infatti soltanto contenere la concentrazione di inquinanti, ma soprattutto conoscere il danno che ciascun inquinante può produrre sul singolo oggetto presente ed esposto (scolorimenti, corrosione, attacchi acidi...). Concentrazioni del tutto inferiori a quelle dannose per la salute umana, possono provocare danni irreversibili al patrimonio storico ed artistico, costringendo i restauratori a mettere in atto costosi interventi di restauro. È a questo proposito che le analisi di caratterizzazione materica delle superfici interne assumono grande importanza e permettono di capire quali condizioni microclimatiche e quale tipo di impiantistica e/o interventi risultino compatibili con lo scenario locale. Naturalmente la determinazione del set di va-

Fig. 7 - Tabella sinottica di valutazione di interventi migliorativi delle prestazioni dell'involucro, in rapporto con le classi di esigenze individuate e con indicazione sintetica del livello di ammissibilità dell'intervento sul bene storico.

Contenuto vs. contenitore?

M. Morandotti

CATEGORIE D'INTERVENTO	CLASSI ESIGENZE					AMMISSIBILITÀ
	a	b	c	d	e	
Chiusure verticali opache						
Intonaci termici		■		■		●●
Coibentazione termica con "isolamenti a cappotto"		■				●
Utilizzo di materiali termo-riflettenti						●●
Chiusure verticali trasparenti						
Sostituzione degli infissi con modifica di materiale o di tipologia di infisso	■			■		●●●
Sostituzione del solo vetro con eventuale modifica parziale dell'infisso		■				●●●●
Chiusure orizzontali e/o inclinate						
Introduzione di strato di coibentazione termo-acustica nei solai interpiano		■		■		●●
Introduzione strato coibentazione termica solaio di copertura						●●●
Creazione di intercapedine per la ventilazione naturale delle coperture		■				●●●●
Introduzione di materiali con faccia termo-riflettente nelle coperture						●●●●
Introduzione guaine impermeabilizz. e/o barriere al vapore n. coperture						●●●●
Chiusure orizzontali contro terra						
Rifacimento del solaio con la creazione di un vespaio aerato e introduzione di strato di coibentazione termica		■		■		●●
Realizzazione di trincee di aerazione/ventilazione						●●●
Realizzazione di intercapedine aerata al di sotto del pavimento (pavimento galleggiante)		■		■		●●●

lori termo igrometrici connotanti l'ambiente confinato, non può essere determinato solo in ragione dei valori di conservazione del bene, ma deve essere sottoposto a verifica anche in relazione alle condizioni di benessere per l'utenza, in funzione anche della destinazione d'uso dei locali, e delle attività svolte.

È ben nota infatti la complessità della nozione di benessere, che integra tutti gli aspetti legati alla salute fisica, alla condizione psicologica ed al rapporto uomo-contesto.

Le caratteristiche che determinano il comfort indoor possono essere divise tra quantitative (qualità dell'aria, inquinamento elettromagnetico, radon, qualità dell'illuminazione, rumorosità) e qualitative, ossia misurabili solamente tramite l'esperienza personale diretta. In generale, la declinazione possibile della classe di esigenze del benessere comprende:

- benessere termo-igrometrico (velocità dell'aria, umidità relativa, temperatura)
- benessere visivo (quantità e qualità della luce presente)
- benessere acustico (protezione nei confronti di rumori fastidiosi)
- benessere respiratorio - olfattivo
- benessere tattile
- benessere psicologico
- benessere antropodinamico

In questa sede verranno svolte alcune considerazioni di carattere generale sul solo benessere termo-igrometrico, ritenuto esemplificativo del grado di complessità di interrelazione

con l'ambiente confinato e con il sistema edificio-impianti nel suo complesso.

Le condizioni di benessere termo-igrometrico sono ottenibili solo in una stretta fascia di valori di temperatura, umidità e velocità dell'aria. La sensazione di benessere è tuttavia legata anche all'attività fisica svolta dal soggetto ed alle caratteristiche di isolamento termico del vestiario. Per questa ragione la conoscenza dei parametri ambientali non è sufficiente per valutare in modo completo lo stato di soddisfazione di un individuo in un determinato ambiente e luogo.

Va ricordato che il comfort dipende termicamente da due temperature: temperatura dell'aria e temperatura media radiante dell'involucro dell'ambiente considerato. È possibile raggiungere una condizione di benessere con diverse combinazioni delle due.

I sistemi di riscaldamento tradizionali influiscono sulla temperatura dell'aria, i sistemi radianti a parete, a pavimento o a soffitto innalzano, invece, la temperatura radiante, diminuendo quella dell'aria.

Esiste tuttavia la possibilità che alcune circostanze possano generare condizioni di discomfort locale. Tra queste ad esempio un eccessivo gradiente termico nella stratificazione dell'aria all'interno dello spazio confinato, fenomeni di asimmetria nella distribuzione della temperatura media radiante (ad esempio nel caso di pareti con ampie superfici vetrate con una limitata prestazione termica

della serramentistica), oppure la presenza di correnti d'aria.

Con attività leggera, ossia sedentaria, si considerano i seguenti valori di comfort:

- temperatura operativa compresa tra 18° - 23° C nel periodo invernale
- temperatura operativa compresa tra 23° - 26° C nel periodo estivo
- umidità relativa compresa tra 30%-70%
- velocità dell'aria inferiore a 0,2 m/s
- temperatura di pavimento compresa tra 19° - 26° C (fino a 29° C per pavimenti radianti).
- l'eventuale asimmetria in direzione orizzontale della temperatura radiante dovuta a superfici fredde e calde (ad esempio finestre, radiatori ecc.) deve essere inferiore a 10°C (la misura viene riferita a una piccola superficie planare posta a 0,6 m dal pavimento)
- l'eventuale asimmetria in direzione verticale della temperatura radiante, dovuta in particolare all'irradiazione del 'Pavimento e del soffitto, deve essere inferiore a 5° C (la misura viene riferita a una piccola superficie planare parallela ai piani emittenti, posta a 0,6 m dal pavimento).

Negli edifici storici sussiste maggiore possibilità di discomfort localizzato dovuto a elementi quali:

- pareti poco isolate e, di conseguenza, basse temperature interne e bassa temperatura radiante
- pavimenti poco isolati e pavimento freddo,

nonché elevato gradiente verticale di temperatura

- pareti fredde che causano correnti discendenti con discomfort localizzato
- livelli di umidità nell'involucro per risalita capillare o perdite
- possibilità di condensa superficiale nei punti freddi della parete
- spifferi dovuti alla scarsa tenuta dei serramenti.

Lo spessore elevato della massa muraria, invece, rappresenta una risorsa in termini di inerzia termica estiva, garantendo valori importanti di sfasamento dell'onda termica.

Per quanto riguarda la ventilazione, che risulta fondamentale per la salubrità dell'ambiente indoor, essa può essere naturale o forzata, ossia regolata da meccanismi impiantistici.

La ventilazione naturale può essere utilizzata per garantire i corretti ricambi d'aria, ma anche come mezzo di climatizzazione nel periodo estivo. L'immissione e l'estrazione di aria sono generate dalle differenze di pressione dovute alla differenza di temperatura tra interno ed esterno e dall'azione del vento. Essa può avvenire in modo controllato e può essere favorita o inibita in funzione delle scelte progettuali. Oggi è possibile implementare la ventilazione con dispositivi meccanici di ventilazione utilizzando infissi, camini e aperture con dispositivi di apertura meccanici controllati da sensori di anidride carbonica. La ventilazione permette, inoltre, di controllare la concentrazione di va-

Fig. 8 - Tabella sinottica di comparazione tra le esigenze di benessere per fruitori di ambienti confinati (in una simulazione di spazio museale) ed esigenze di conservazione. Analisi sviluppata sul caso di studio dell'Ala Sud della Villa Reale di Monza.

Contenuto vs. contenitore?

M. Morandotti

		PRINCIPALI ESIGENZE DI CONSERVAZIONE				
		legno (pavimentazioni, intarsi, arredi d'epoca, elementi strutturali)	tappezzerie in seta e in velluto	marmi e pietre	pitture su tela	libri e manoscritti
BENESSERE INDOOR	TERMO - IGROMETRICO e qualità dell'aria	Ur = 45-60 %, t = 19°-24° C	Ur = 30%-50%, t = 19°-24° C	Ur = 30%-60%, t = 15°-25° C	Ur = 40%-55%, t = 19°-24° C	Ur = 50%-60%, t = 13°-18° C
	VISIVO	E _{max} = 150 lux	E _{max} = 50 lux	E _{max} non rilevante	E _{max} = 150 lux	E _{max} = 50 lux

pore, prevenendo la formazione di un ambiente ideale alla proliferazione di microorganismi (muffe, colonie fungine), i quali causano la creazione di un ambiente malsano, e limita la concentrazione di gas infiammabili, esplosivi o asfissianti e di composti chimici.

Un fattore importante nella valutazione della qualità dell'aria è, quindi, anche l'umidità relativa, elemento a cui il nostro corpo è sensibile e che è ancora più significativo nel caso di edifici storici. Livelli troppo alti di umidità relativa portano alla proliferazione di muffe e batteri, ma, d'altra parte, livelli troppo bassi creano situazioni di disagio legati a sensazioni di secchezza delle mucose ed eccessiva traspirazione. I valori ottimali di umidità relativa

sono compresi fra il 35% e il 60%, ma sono tollerabili percentuali fino a 80%⁵.

La matrice sopra riportata mostra la correlazione tra i parametri idonei alla conservazione dei materiali del manufatto architettonico e degli oggetti contenuti in esso e i parametri che definiscono il benessere per gli addetti e l'utenza che fruiscono l'edificio. Il colore delle celle indica, per ciascun valore finalizzato alla corretta conservazione del bene monumentale il grado di adeguatezza rispetto alle esigenze di confort del fruitore, scalato in ordine decrescente da verde, a giallo a rosso.

PROSPETTIVE DI IMPLEMENTAZIONE E SVILUPPO

A partire da un insieme di ricerche condotte e in corso presso il Laboratorio STEP dell'Università di Pavia, si è tentato di delineare un insieme di riflessioni coordinate sul tema dell'approccio metodologico per una attività di conservazione del patrimonio monumentale esistente, orientata alla sostenibilità di processo.

Gli aspetti considerati in queste pagine si concentrano sulla valutazione di impatto di soluzioni progettuali orientate alla funzionalizzazione del bene, alla programmazione della sua fruizione, e infine alla possibile integrazione di tecnologie e approcci orientati al miglioramento delle sue performance energetiche. Si tratta quindi di considerazione che nel contesto del processo di intervento si collocano tutte in una fase pre-progettuale.

A queste si dovrà affiancare, e al momento è in atto un ricerca specifica sul tema, una proposta orientata alla individuazione di strategie di gestione sostenibile del bene in una prospettiva di medio periodo. Elemento chiave di questo terzo ambito di prossimo approfondimento sarà l'insieme di procedure, metodi e modelli che vanno sotto il nome di conservazione programmata. È infatti evidente che se la sostenibilità dell'intervento è legata alla riduzione dei consumi e alla minimizzazione delle risorse, ivi comprese quelle per il restauro e al conservazione, non è possibile prescindere dalla definizione di piani di conservazione programmata, orientati a consentire – a restauro avvenuto – il mantenimento nel tempo dei livelli di degrado e dei

limiti di prestazione all'interno di soglie di accettabilità definite a monte del piano stesso.

Conoscenze del bene e delle sue dinamiche di alterazione, monitoraggio scalare per elementi costitutivi e nodi problematici, e procedure speditive di intervento mirato e circoscritto costituiscono i poli generatori di un approccio *life cycle oriented* alla conservazione del patrimonio culturale che pare essere oggi una alternativa non più rinviabile in una prospettiva sostenibile di conservazione e valorizzazione del patrimonio monumentale.

NOTE

[1] Cfr. "Codice dei beni culturali e del paesaggio", D. Lgs. 22 gennaio 2004, n. 42. e succ. mm. e int., art.6, c.1.

[2] Cfr. ibidem, art.6, c.2.

[3] Cfr. ibidem, art. 55, c3bis.

[4] La ricerca possedeva una sua prospettiva analitica generale, ed una fase applicativa, avente per oggetto di simulazione di intervento l'Ala Sud della Villa Reale di Monza. Il gruppo di lavoro era così composto e articolato: Marco Morandotti (coordinatore) Daniela Besana, Maria Pia Riccardi, Bruno Messiga, Valentina Cinieri, Elena Basso, Marco Malagodi (affidenti al Centro

Interdisciplinare di Studi e Ricerche per la Conservazione dei Beni Culturali dell'Università di Pavia); Viviana Guidetti, Rosaria Avagliano, Marco Grandi (affidenti ad Arkedos srl); Sergio Olivero, Federico Stirano, Diego Donfrancesco, Roberta Sabbatelli (affidenti all'Istituto Superiore sui Sistemi Territoriali per l'Innovazione di Torino).

[5] La norma UNI EN ISO 13788, ad esempio, pone come limite di umidità relativa sulle superfici interne 80%, poiché a questo valore e ad una temperatura maggiore o uguale di 20°C si raggiunge la condizione critica per lo sviluppo delle muffe. La nor-

ma UNI EN 15251 stabilisce le indicazioni di umidificazione e deumidificazione in relazione alla destinazione d'uso dell'edificio ed alla presenza di persone.

BIBLIOGRAFIA

Arcolao, Carla (2008), *La diagnosi nel restauro architettonico*, Marsilio, Venezia

Bertoldini, Marisa, Campioli, Andrea (2008), *Cultura tecnologica e ambiente*, Città Studi, Milano.

Cecchi, Roberto, Gasparoli, Paolo (2010), *Prevenzione e manutenzione per i beni culturali edificati*, Alinea, Firenze.

Delmastro, Michele, Marti-

nelli, Nicola Marsocci, Lorenzo (2000), *La manutenzione programmata in edilizia: metodi e strumenti operativi, dalla progettazione alla gestione dei patrimoni*, Il Sole 24 Ore Ed., Milano.

Gasparoli, Paolo, Talamo, Cinzia (2006), *Manutenzione e recupero. Criteri, metodi e strategie per l'intervento sul costruito*, Alinea, Firenze

Lavagna, Monica (2008), *Life Cycle Assessment in edilizia. Progettare e costruire in una prospettiva di sostenibilità ambientale*, Hoepli, Milano